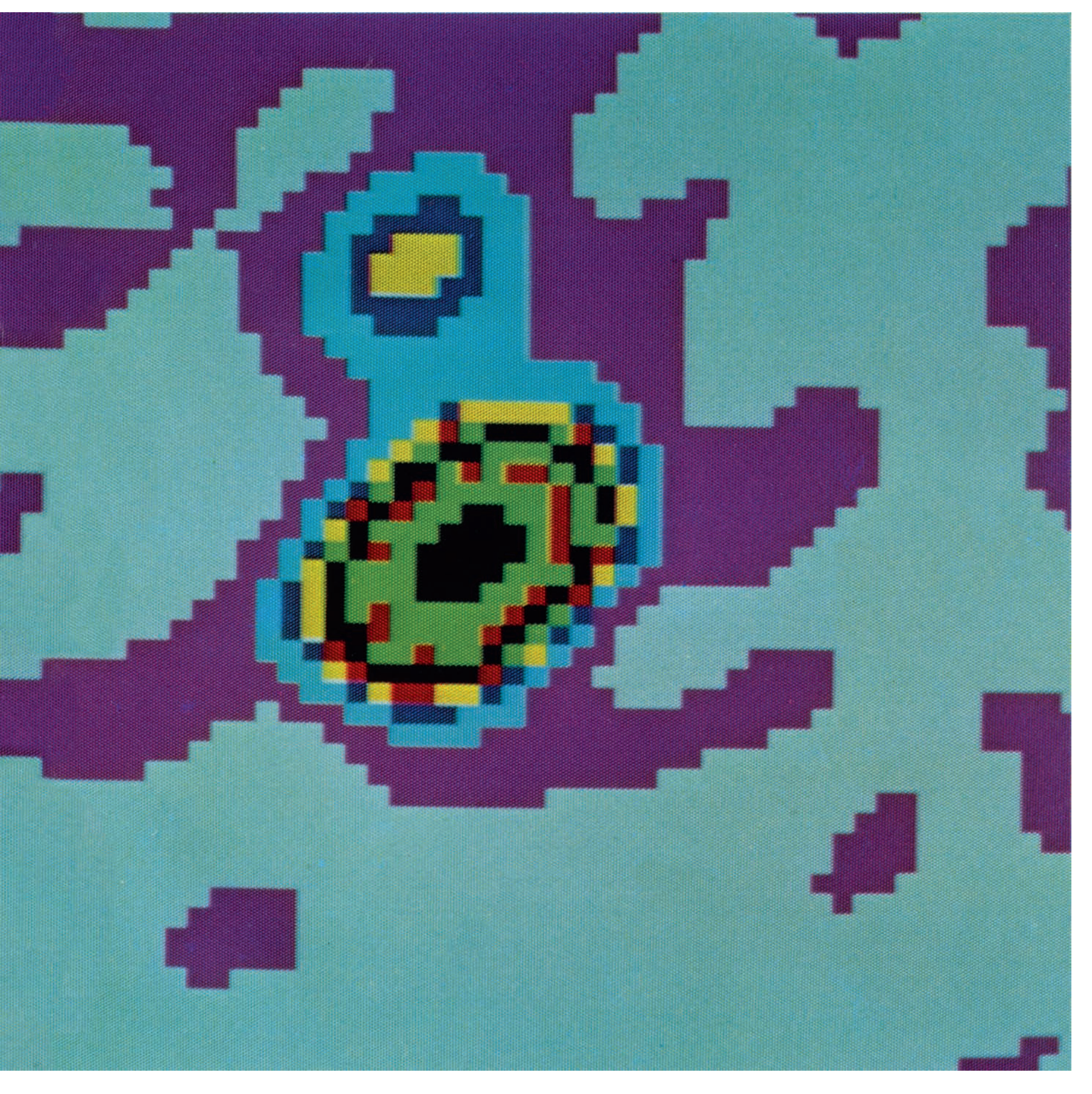
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



LENTES GRAVITACIONALES

Enero 1981

250 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 52
Enero 1981

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Lluïsa Vilageliu: *Multiplicación génica y resistencia a fármacos;* Manuel Puigcerver: *Descubrimiento de una lente gravitatoria;* Juan Carlos Zabala y Fernando de la Cruz: *Carbohidratos;* Cristóbal Mezquita: *El aparato vestibular;* Antonio Creus: *Superconductores en circuitos de potencia;* Antonio Blanco: *El poblamiento del Pacífico;* Manuel Ballester: *Reacciones químicas sin solvatación;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Antonio Pulido, José Bernabeu y Juan Francisco Martín

Libros:

Arturo Valls, Luis Alonso y Antonio Crespo



LA PORTADA

La fotografía de la portada es una representación generada por ordenador en tubo de rayos catódicos de una imagen de un quasar cuya radiación ha sido desviada por una galaxia elíptica que actúa de lente gravitatoria, dando dos imágenes del quasar. La zona mayor, polícroma, es la imagen meridional del quasar, y la pequeña zona amarilla es, probablemente, la galaxia. La imagen septentrional, así como la meridional, del quasar se pueden ver en otras representaciones generadas por ordenador (véase "Descubrimiento de una lente gravitatoria", por Frederic H. Chaffee, Jr., en este mismo número). Los colores (blanco, púrpura, azul claro, azul oscuro, amarillo, rojo y verde) corresponden, respectivamente, a regiones de intensidad creciente de radioondas con una longitud de onda de seis centímetros. Los datos para la representación se recogieron en febrero por la Gran Distribución del Observatorio Nacional de Radioastronomía cerca de Socorro. La representación fue preparada por Perry E. Greenfield y Bernard F. Burke, del MIT, y David H. Roberts, de Brandeis.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.°, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: cortesía de David H. Roberts, Universidad de Brandeis

Página	Fuente
6	C. Mezquita y J. Vives Mañé
8-11	T. Sellés
12	C. Mezquita
13-18	T. Sellés
21	Robert T. Schimke, Stanford University (*arriba*); Lawrence A. Chasin y Gail Urlaub, Universidad de Columbia (*abajo*)
22-24	Bunji Tagawa
25	Robert T. Schimke, Universidad de Stanford
26-28	Bunji Tagawa
29	Robert T. Schimke, Universidad de Stanford
30	Peter C. Brown, Universidad de Stanford
33	National Radio Astronomy Observatory
34	National Radio Astronomy Observatory (*arriba*), Smithsonian Astrophysical Observatory y Universidad de Arizona (*abajo*)
35	Hale Observatories
36-39	Allen Beechel
40-41	Alan N. Stockton, Universidad de Hawai en Manoa
49	Fredric Silverblatt y Craig Kuehn, Veterans Administration Hospital, Calif.
50-58	Allen Beechel
63	Dean E. Hillman, Universidad de N. Y. (*arriba*) Muriel D. Ross, Universidad de Michigan (*abajo*)
64-70	Patricia J. Wynne
71	Ralph Morse (*arriba*) Patricia J. Wynne (*abajo*)
72	Patricia J. Wynne (*arriba*) Ralph Morse (*abajo*)
73	National Aeronautics and Space Administration
74	Patricia J. Wynne
79	T. H. Geballe, Universidad de Stanford
80-90	Gabor Kiss
93	Tom Prentiss
94-98	Andrew Tomko
99	Klim Gollan, Australian National University (*arriba*) Matthew Spriggs, Australian National University (*abajo*)
100	Andrew Tomko
101	W. Wilson
105-111	Jerome Kuhl
114-118	Ilil Arbel
120	Leon Glass
121-124	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

CRISTOBAL MEZQUITA PLA ("Espermatogénesis") es profesor agregado de fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona. Cursó sus estudios de medicina en dicho centro, donde se graduó en 1967 y obtuvo el doctorado en 1974. Su interés por la espermatogénesis le ha llevado a estudiar el tema en el laboratorio de fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona, en el departamento de química macromolecular de la Universidad Politécnica de Barcelona (entre 1970 y 1972) y en el departamento de biología celular del Baylor College of Medicine, en Houston, Texas, donde fue becario postdoctoral y Visiting Research Associate (entre 1974 y 1978). Aparte de su dedicación a la docencia de la fisiología, su principal área de interés la constituye la investigación de los mecanismos moleculares que controlan la expresión genética en los organismos superiores.

ROBERT T. SCHIMKE ("Multiplicación génica y resistencia a fármacos") enseña biología en la Universidad de Stanford, en cuya Facultad de Medicina cursó sus estudios, licenciándose en 1958. Entre 1960 y 1966 trabajó en los National Institutes of Health de los Estados Unidos. Entró a formar parte del claustro de la Facultad de Stanford en 1966. Desde 1978 es director de su departamento de biología. Los temas de investigación en los que más se ha interesado Schimke han sido los mecanismos de la acción hormonal en la regulación metabólica y en el desarrollo y los mecanismos de control de la tasa de recambio metabólico de las proteínas en los animales.

FREDERIC H. CHAFFEE, JR. ("Descubrimiento de una lente gravitatoria") es astrónomo del Observatorio Smithsoniano del monte Hopkins, en las montañas de Santa Rita, Arizona. Se graduó en el Darmouth College en 1963, doctorándose por la Universidad de Arizona en 1968. Ingresó entonces en el Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Cambridge, Massachusetts, y en 1970 pasó a residir en el nuevo observatorio de Arizona. Los principales temas de investigación que interesan a Chaffee son la espectroscopía estelar de alta resolución, las nubes interestelares y, recientemente, los quasars.

NATHAN SHARON ("Carbohidratos") dirige el departamento de biofísica del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel. Nacido en Polonia, emigró a Israel (entonces Palestina) con su familia en 1934. Estudió en la Universidad Hebrea de Jerusalén, por la que se graduó en 1950 y se doctoró en 1953. Ingresó en el Instituto Weizmann en 1954. Durante el bienio de 1977-78 disfrutó de una beca Fogarty en los National Institutes of Health estadounidenses y fue profesor del departamento de ciencias biológicas de la Universidad de California en Santa Bárbara. Esta es la segunda vez que colabora con INVESTIGACION Y CIENCIA, pues en agosto de 1977 apareció un artículo suyo sobre lectinas.

DONALD E. PARKER ("El aparato vestibular") es profesor de psicología de la Universidad de Miami, en Oxford, Ohio. Licenciado por la Universidad DePauw en 1958, se doctoró en psicología experimental por la de Princeton en 1961. Realizó investigaciones postdoctorales en el laboratorio de investigación de la audición de Princeton en 1961. Entre 1962 y 1965 trabajó para los laboratorios de investigación médica aeroespacial de la base Wright-Patterson de las Fuerzas Aéreas Norteamericanas. En 1965 colaboró con Hermann Schöne en el Instituto Max Planck de Fisiología de la Conducta en Seewiesen, Alemania Occidental, en el estudio de la psicofisiología del sistema vestibular. Parker entró a formar parte del profesorado de la Universidad de Miami en 1966. Además de sus investigaciones sobre el sistema vestibular, está estudiando el efecto de distintas ondas sonoras y vibraciones en la percepción y rendimiento. Su interés académico se centra hoy en los fenómenos asociados con la pérdida temporal o permanente de la audición.

T. H. GEBALLE y J. K. HULM ("Superconductores en circuitos de potencia") son físicos con un interés común en el tema de su artículo: electrotecnología de la superconducción. Geballe es profesor de física aplicada de la cátedra Rosenberg de la Universidad de Stanford y consultor de materiales de los Laboratorios Bell. Licenciado por la Universidad de California en Berkeley en 1941, se recibió de doctor en 1950. De 1952 a 1968 fue miembro del equipo técnico de los Laboratorios Bell. Miembro del claustro de Stanford desde 1968. Durante sus trabajos de doctorado colaboró con W. F. Gianque, un pionero en la física de bajas temperaturas. "Se emplearon, cuenta, muchas horas en la licuefacción de cantidades preciosas de helio, al objeto de experimentar a bajas temperaturas. Me siento afortunado por haber podido participar en los años iniciales de las investigaciones científicas sobre la comprensión de la superconductividad. Que estas investigaciones hayan abierto el camino a tecnologías como las que describimos en nuestro artículo es un desarrollo inesperado y gratificante." Hulm es director de investigación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Westinghouse Electric Corporation. Nacido en Gran Bretaña, se licenció en física del estado sólido por la Universidad de Cambridge en 1943 doctorándose por esa misma institución en 1949. Desde 1949 hasta 1951 trabajó en el Instituto para el Estudio de los Metales de la Universidad de Chicago; allí enseñó física, desde 1951 hasta 1954.

P. S. BELLWOOD ("El poblamiento del Pacífico") es catedrático de prehistoria de la Universidad Nacional de Australia. Nacido en Gran Bretaña, obtuvo sus títulos académicos por la Universidad de Cambridge. Entre 1967 y 1972 fue profesor de la Universidad neozelandesa de Auckland, y allí comenzó sus investigaciones sobre Polinesia. Miembro del claustro de la Universidad Nacional de Australia desde 1973, donde amplió sus investigaciones para incluir en ellas a Indonesia y a Malasia. También explica arqueología del Medio Oriente, en la que está muy interesado, aunque con carácter secundario, lo mismo que en las civilizaciones antiguas de las Américas. Al hacer entrega de este trabajo para INVESTIGACION Y CIENCIA Bellwood añadió: "Volvamos al trabajo en mi cueva (con un equipo de colaboradores malayos del museo de Sabah), en Kota Kinabalu, en Malasia Oriental".

ROBERT T. McIVER, JR. ("Reacciones químicas sin solvatación") es profesor de química de la Universidad de California en Irvine. Se graduó en química por la Universidad de Kansas en 1967 y obtuvo su grado de doctor en química física por la Universidad de Stanford en 1971, año en que se integró en la facultad de Irvine. En 1979 recibió el premio de investigación "Distinguished Research Award" de su universidad.

Hace...

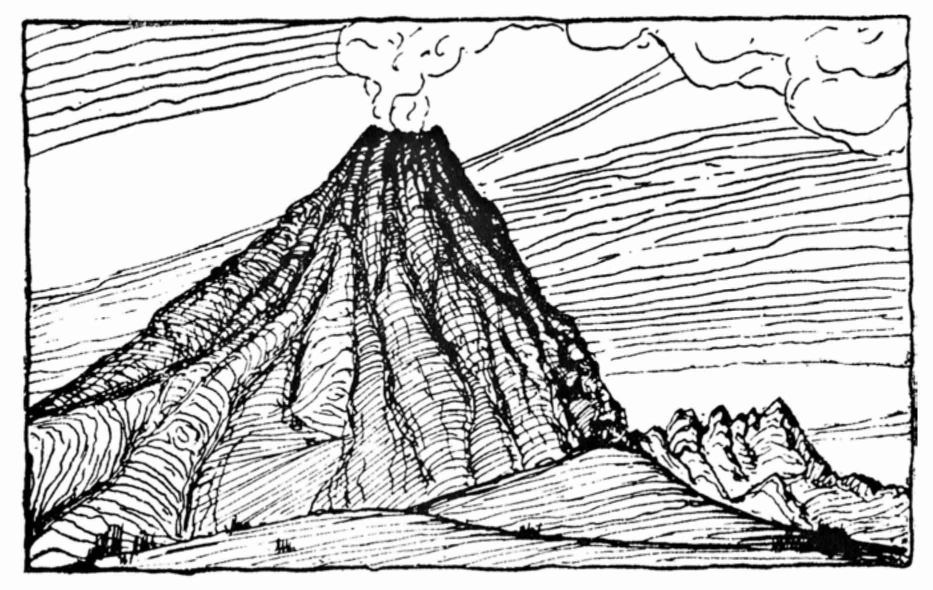
José M.ª López Piñero

... ciento cincuenta años

Nació en Cartagena Marcos Jiménez de la Espada, que llegaría a ser una de las principales figuras de la zoología en la España del siglo XIX. Hijo de un funcionario que cambió de destino en varias ocasiones, estudió el bachillerato en Valladolid, Barcelona y Sevilla. En 1850 comenzó a cursar, en la Universidad de Madrid, la licenciatura de Ciencias, sección de Naturales. Se graduó de licenciado cinco años más tarde, con una disertación sobre *Los anfibios de Blainville y los batracios de Cuvier forman una clase aparte,* tema en torno al cual realizaría después sus más importantes contribuciones.

En 1853 ganó una plaza de ayudante de Historia Natural en la Universidad de Madrid y en 1857 otra, asimismo de ayudante, en el Museo de Ciencias Naturales de la Corte. Durante siete años trabajó en ambas instituciones, centrándose en la zoología y la anatomía comparada. En 1862 fue elegido miembro de la Comisión Científica del Pacífico, constituida con la finalidad de realizar una expedición a América del Sur para recoger materiales de interés zoológico, botánico, geológico y antropológico, con destino al Museo de Ciencias Naturales y al Jardín Botánico de Madrid.

La expedición partió de Cádiz en agosto de 1862. Contaba con ocho naturalistas que disponían de dos fragatas y una goleta de la marina de guerra. Tras hacer escala en las islas Canarias y Cabo Verde, llegó a Brasil, de donde pasó a Uruguay. Allí se dividió en dos partes, una de las cuales se dirigió a Chile, atravesando el continente, mientras que la otra –en la que figuraba Jiménez de la Espada– continuó el viaje por mar a través del Estrecho de Magallanes. Los expedicionaros estuvieron a continuación en Chile, Perú y Centroamérica, volviendo de nuevo a Perú, donde se encontraban en marzo de 1863. Se declaró entonces la llamada "guerra del Pacífico" entre España y Perú, y los barcos de la expedición recibieron órdenes de abandonarla. Jiménez de la Espada y otros tres miembros de la misma decidieron, sin embargo, terminar la tarea que se les había encomendado, a pesar de recibir desde España órdenes de regresar, que después fueron revocadas.



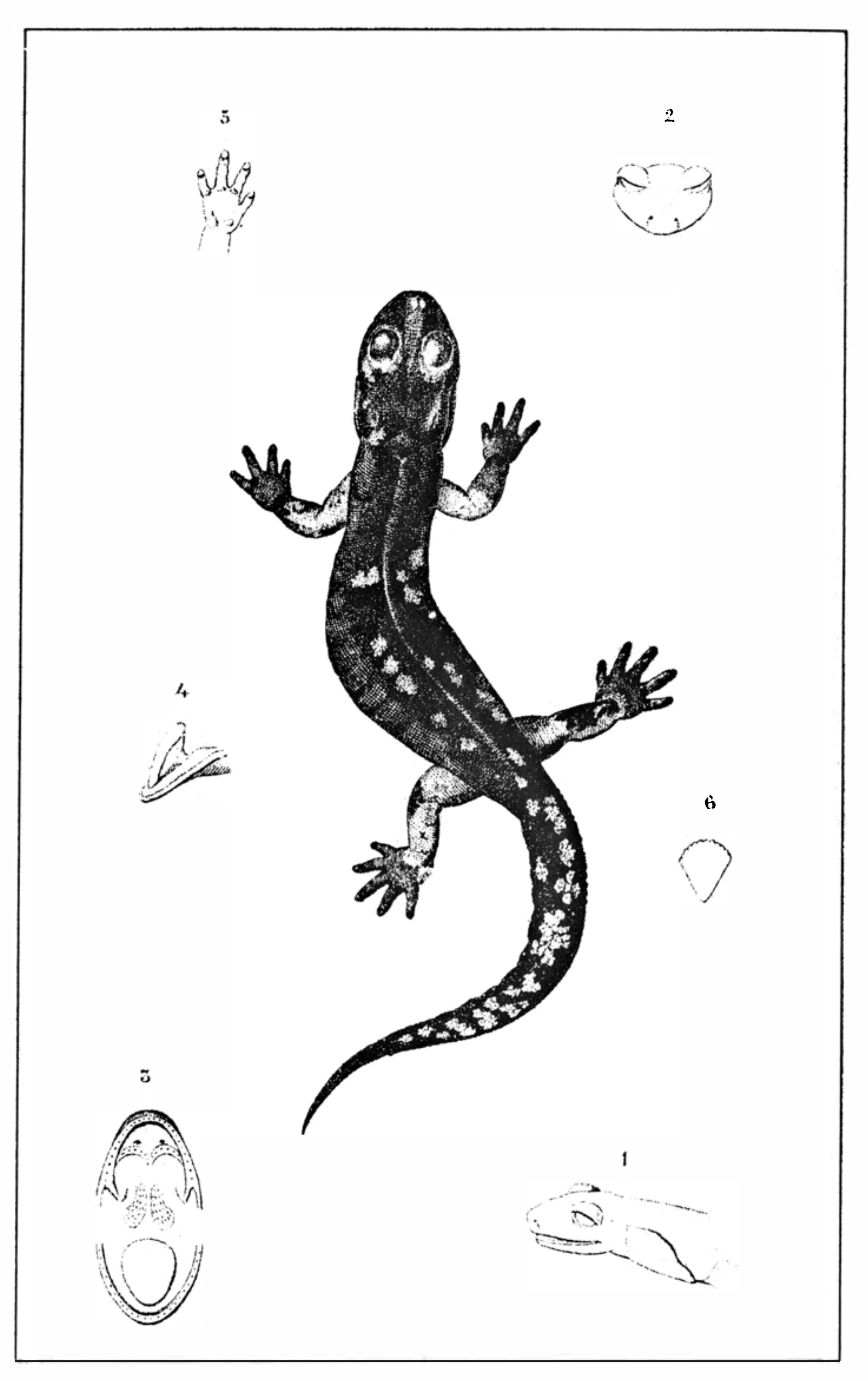
El volcán Cotopaxi, según un dibujo del **Diario** *de Marcos Jiménez de la Espada en la expedición al Pacífico llevada a cabo por una comisión de naturalistas españoles durante los años 1862 a 1865*

Antes de continuar el viaje, el naturalista español realizó un minucioso estudio del volcán Pichincha, en cuyo cráter –al que había bajado solo– se perdió durante cuatro días, con grave peligro de su vida. Por fin, los cuatro expedicionarios que quedaban, desde febrero hasta septiembre del año 1865, atravesaron América del Sur por su parte más ancha, pasando la cordillera andina y llegando al río Napo, por el que navegaron hasta alcanzar el río Amazonas y, por él, el Atlántico.

De regreso en España en diciembre de 1865, Jiménez de la Espada se reincorporó a sus puestos en el Museo de Ciencias Naturales y en la Universidad de Madrid. Durante más de seis años su trabajo consistió en ordenar y estudiar el material zoológico recogido en América y en preparar las correspondientes publicaciones. La primera de ellas fue el artículo titulado "Algunos datos nuevos o curiosos acerca de la fauna del Alto Amazonas. Mamíferos", que apareció en el *Boletín-Revista de la Universidad de Madrid* el año 1870.

En él expuso el comportamiento del murciélago *Thyroptera albiventer* y describió, por vez primera, las especies de primates *Leontocebus graellsi* y *Leontocebus lagonotus.* El siguiente año publicó, en el *Jornal* de la Academia de Ciencias de Lisboa, el informe "Faunae neotropicalis species quaedam nondum cognitae" ("A propósito de ciertas especies de la fauna neotropical de las que no se tenía conocimiento"), dedicado a ofrecer la descripción original de varios géneros de anfibios sudamericanos. Fue uno de los fundadores, en 1870, de la Sociedad Española de Historia Natural, en cuyos *Anales* aparecieron varios de sus trabajos científicos. Uno de ellos (1875) versó sobre un curioso ejemplar de la familia de los salamándridos, que le sirvió para establecer la nueva especie *Urotropis platensis.*

Sin embargo, la más importante de sus publicaciones relacionadas con los vertebrados, recogidos durante el viaje al Pacífico, fue un volumen de más de doscientes páginas sobre los batracios.



Urotropis platensis, *nueva especie de la familia de los salamándridos establecida por Jiménez de la Espada a partir de un ejemplar hallado en las cercanías de Montevideo. Lámina de su artículo sobre el tema publicado en 1875*

Barreiro destaca en esta obra el estudio sobre el pequeño sapo *Rhinoderma darwini.* Frente a las afirmaciones erróneas de naturalistas anteriores, Jiménez de la Espada demostró que las hembras del mismo eran ovíparas y que los machos recogían los embriones en el saco bucal, conservándolos hasta que se convertían en renacuajos.

La publicación de los trabajos de Jiménez de la Espada sufrió un duro golpe cuando se decretó la disolución de la comisión encargada del estudio de los materiales recogidos en la expedición al Pacífico. No pudo aprovechar, entre otros, su rica colección de mamíferos del Alto Amazonas, que incluía más de un centenar de especies, de las cuales treinta y cinco eran desconocidas en 1865. El naturalista cartagenero solamente llegó a publicar la descripción de las dos especies de primates antes citadas. Veinte especies más de las que allí figuraban fueron descritas por autores extranjeros con material obtenido por otros viajeros que posteriormente visitaron Sudámerica. De otras trece ofreció la caracterización original Angel Cabrera, discípulo de Jiménez de la Espada, que dedicó una serie de ocho estudios monográficos a esta rica colección entre 1900 y 1917. También quedó inédito el *Diario* que Jiménez de la Espada había ido redactando durante la expedición. Este importante texto no apareció hasta 1928, fecha en que la Real Sociedad Geográfica publicó una edición a cargo de Agustín J. Barreiro.

Sin abandonar totalmente la zoología, durante las dos últimas décadas de su vida Jiménez de la Espada se dedicó principalmente a los estudios históricos sobre América. Nada hemos de decir aquí de este aspecto de su obra, salvo subrayar que, en parte, se refiere a la actividad científica que los españoles habían desarrollado antes en el Nuevo Mundo.

A este respecto, sus contribuciones más destacadas fueron las ediciones de la *Historia del Nuevo Mundo* del gran naturalista del siglo XVII Bernabé Cobo (1890-95) y de las célebres *Relaciones Geográficas de Indias* (1881-98). Proyectó también un amplio estudio sobre la expedición científica de Malaspina a finales del siglo XVIII, pero tuvo que abandonarlo por falta de medios para imprimirlo. Solamente publicó un artículo (1872) sobre las instrucciones que Lázaro Spallanzani envió a los expedicionarios acerca de la recolección de animales y minerales. Por el mismo motivo, quedaron asimismo manuscritos sus materiales en torno a la bibliografía de la historia natural en España.

Por otra parte, le interesaron los estudios geográficos. Fue uno de los fundadores de la Sociedad Geográfica de Madrid (1875), directivo de la Asociación Española para la Exploración de Africa (1877) y miembro de la comisión española que arbitró en el pleito fronterizo entre Venezuela y Colombia (1891).

Numerosas instituciones científicas españolas y de otros países europeos nombraron miembro honorario a Jiménez de la Espada. Un hecho curioso es que presentó su tesis doctoral en abril de 1898, tres meses antes de ser nombrado catedrático de Anatomía comparada y seis antes de su muerte.

Espermatogénesis

El espermatozoide, una de las células más altamente especializadas del organismo, surge en virtud de una dramática metamorfosis celular. ¿Qué mecanismos moleculares explican este sorprendente proceso de diferenciación?

Cristóbal Mezquita Pla

Los espermatozoides contienen la información genética requerida para la transmisión hereditaria de los caracteres de la especie y la maquinaria molecular precisa para la preservación, transporte e introducción en el óvulo de dicha información. Las micrografías de la página opuesta muestran la morfología de los espermatozoides del cobayo y del gallo, las dos especies que hemos utilizado fundamentalmente en nuestras investigaciones. Puede observarse en dichas micrografías el volumen diminuto de los núcleos de los espermatozoides y su forma altamente hidrodinámica. ¿Qué cambios estructurales de la cromatina de las células germinales permiten empaquetar el ADN en un volumen nuclear tan extraordinariamente reducido? ¿Cómo se preserva la integridad del mensaje genético vehiculizado por los espermatozoides? ¿Qué mecanismos controlan la expresión de la información genética responsable del proceso de diferenciación de las células testiculares? Y ¿cómo se borra ulteriormente el programa de diferenciación para dar lugar al mensaje genético de los espermatozoides, verdadera *tabula rasa* que transmite todos los caracteres de la especie?

Para contribuir a la resolución de estas y otras cuestiones relativas a la biología molecular de la espermatogénesis, iniciamos nuestro trabajo de investigación en este campo en los primeros años de la década de los 70. Desde entonces nuestro objetivo fundamental ha consistido en investigar la relación existente entre los cambios de composición, estructura y actividad funcional de la cromatina a lo largo de la espermatogénesis. La diferenciación de las células germinales del testículo constituye un modelo ideal para este tipo de investigaciones.

Dadas las evidentes limitaciones de los métodos citoquímicos o de los métodos bioquímicos que parten de la totalidad del testículo resultaba imprescindible recurrir a técnicas que permitieran la separación de las distintas células germinales o de sus núcleos. Para separar los núcleos de las células testiculares utilizamos el método denominado "velocidad de sedimentación unidad". Este método se basa en las diferencias de volumen de las partículas a separar. Cuando estas diferencias son considerables, basta el campo gravitatorio terrestre, fuerza de sedimentación unidad, para que las partículas de distintos volúmenes se distancien entre sí varios milímetros al cabo de tres o cuatro horas de sedimentación espontánea. El método permite separar los núcleos de las células testiculares gracias a los drásticos cambios de volumen que aquellos experimentan a lo largo de la espermatogénesis.

En efecto, el proceso de diferenciación que da lugar a los espermatozoides se inicia con las espermatogonias. Estas células, tras una serie de divisiones, originan los espermatocitos primarios, los cuales llegan a poseer doble cantidad de ADN que las espermatogonias y un volumen nuclear mayor. Al dividirse los espermatocitos primarios (primera división meiótica) originan los espermatocitos secundarios, reduciéndose a la mitad el contenido de ADN y disminuyendo también el volumen nuclear. Los espermatocitos secundarios se dividen a su vez (segunda división meiótica) para dar lugar a las espermátidas, con una nueva reducción a la mitad del contenido de ADN y un volumen nuclear mucho menor. Finalmente, las espermátidas ya no se dividen pero experimentan un notable proceso de metamorfosis nuclear y citoplasmática denominado espermiogénesis que origina los espermatozoides y que va acompañado de una drástica reducción del volumen nuclear.

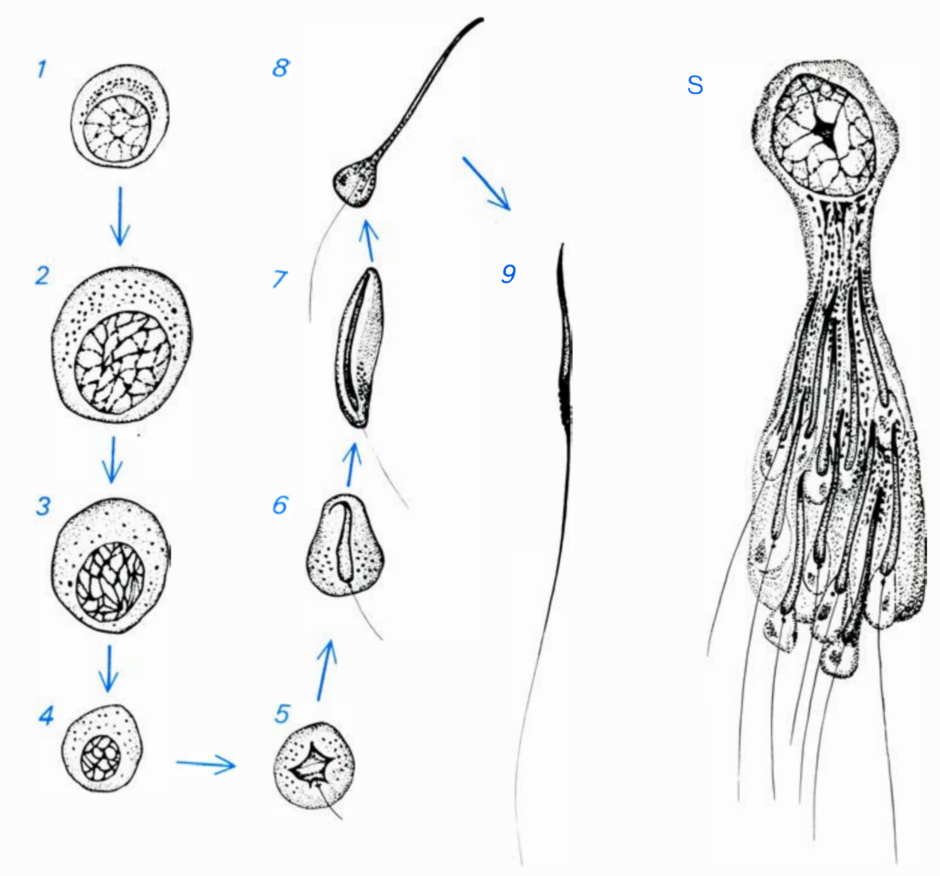
En la ilustración de la página siguiente se han representado esquemáticamente distintas células del testículo del gallo en varios estadios de diferenciación. Puede observarse la notable reducción del volumen nuclear a medida que progresa la espermatogénesis. El núcleo de los espermatocitos primarios es una esfera de 110 micrometros cúbicos de volumen. Las espermátidas primitivas tienen núcleos esféricos de sólo 25 micrometros cúbicos, y, a medida que progresa la espermiogénesis, el núcleo se transforma en una elipsoide cuyo eje longitudinal se alarga progresivamente mientras que el transversal se reduce, siendo el volumen final del núcleo de los espermatozoides de tan sólo 2 micrometros cúbicos. Estas notables diferencias de volumen permiten separar los núcleos de las células testiculares por sus diferentes velocidades de sedimentación en el campo gravitatorio terrestre.

Antes de proceder a la separación de los núcleos por velocidad de sedimentación unidad, deben obtenerse en forma pura, sin contaminantes citoplasmáticos y por un método que no altere el volumen nuclear. El esquema de la

ESPERMATOZOIDES de cobayo (*arriba*) y de gallo (*abajo*) teñidos con naranja de acridina y observados con el microscopio de fluorescencia, en la página opuesta. Los núcleos cilíndricos de los espermatozoides del gallo (*fluorescencia amarilla*) poseen un volumen de unos dos micrometros cúbicos y contienen alrededor de 1 picogramo de ADN. En un extraordinario proceso de miniaturización, el núcleo de los espermatozoides encierra, altamente protegida, la información necesaria para la transmisión hereditaria de todos los caracteres de la especie. Los espermatozoides disponen, además, de la maquinaria molecular precisa para introducir en el óvulo dicha información. El acrosoma (*fluorescencia roja*) contiene los enzimas responsables de la penetración en el óvulo. Los movimientos de la cola propulsan la célula a una velocidad de varios milímetros por minuto. El desplazamiento se realiza con la máxima economía energética gracias a la forma altamente hidrodinámica de los espermatozoides. Aumento × 1500.

página 9 indica los pasos seguidos para el aislamiento y purificación de los núcleos de las células testiculares del gallo. La homogeinización rompe las membranas celulares y libera la mayoría de los núcleos. Estos pueden separarse del citoplasma por ultracentrifugación a través de una disolución de sacarosa de alta densidad. En la ilustración de la página 10 se ha representado un esquema del proceso de separación de los núcleos por el método de la velocidad de sedimentación a fuerza de gravedad unidad. En la parte superior del esquema hay un dispositivo para la creación de un gradiente de sacarosa que llenará la cámara de sedimentación cilindrocónica. El gradiente de densidad no es esencial para la separación, pero estabiliza el líquido y evita que los núcleos una vez separados se mezclen como consecuencia de las corrientes de convección. Antes de iniciarse la separación, la muestra que contienen los núcleos forma una delgada capa en la superficie del líquido que llena la cámara de sedimentación. Al cabo de 3 o 4 horas, los núcleos forman cuatro capas que corresponden a las siguientes velocidades de sedimentación: 2,0; 1,7; 0,8 y 0,5 milímetros por hora.

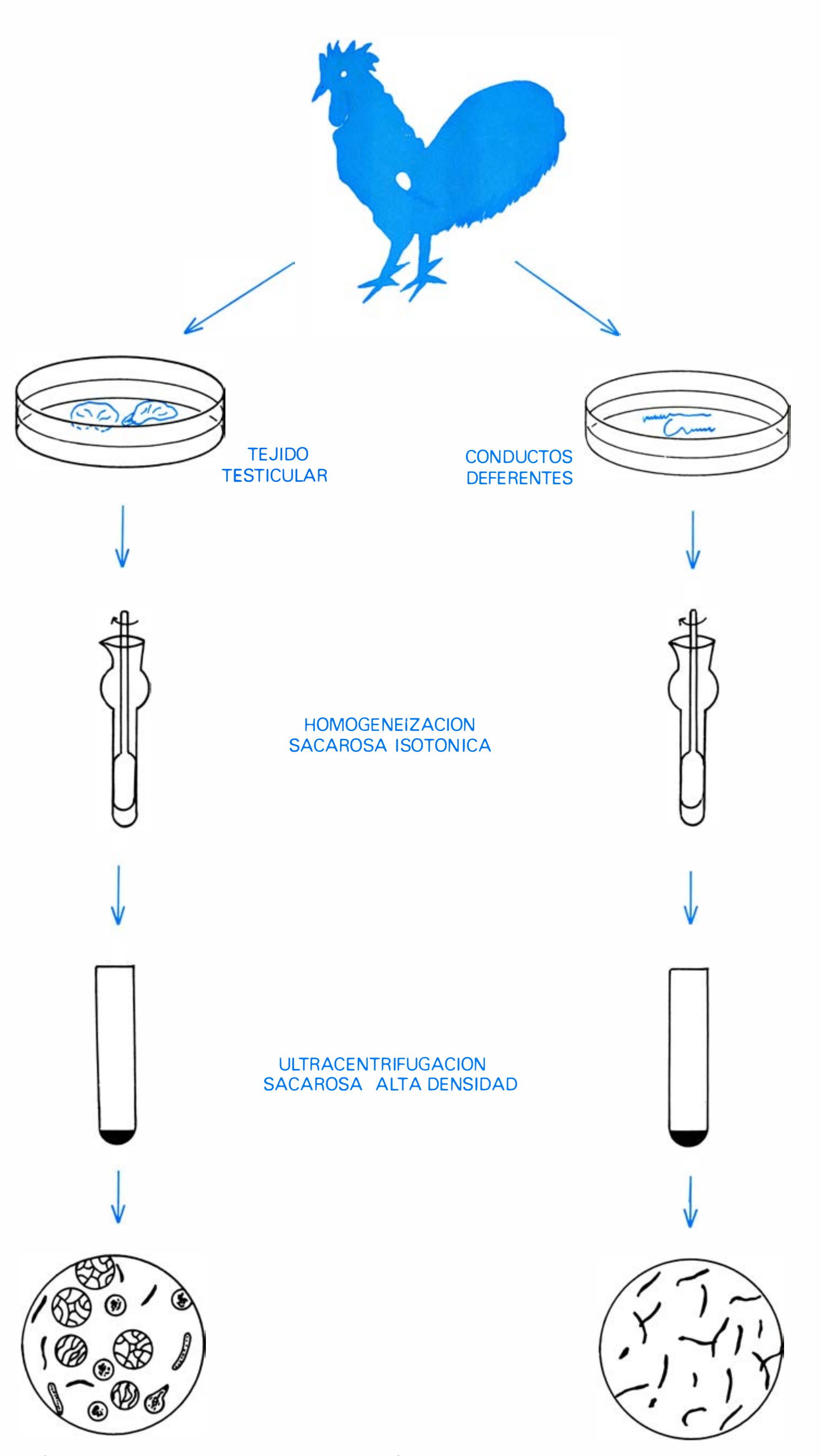
Los distintos tipos de núcleos fueron caracterizados por su morfología y por su contenido en ADN, ARN, proteínas básicas (histonas y protaminas) y proteínas no histonas. La fracción que sedimenta a mayor velocidad, 2,0 milímetros por hora, consiste en grandes núcleos esféricos intensamente teñidos, con una red de cromatina que se extiende a todo el espacio nuclear. Estos núcleos pertenecen a los espermatocitos primarios y su contenido de ADN (4,27 picogramos) es doble del correspondiente a las células somáticas. Hemos designado esta fracción nuclear como estadio I. El estadio II corresponde a núcleos con una velocidad de sedimentación de 1,7 milíme-



CELULAS TESTICULARES DEL GALLO en distintos estadios de la espermatogénesis. Las espermatogonias (*1*), tras una serie de divisiones, dan lugar a los espermatocitos primarios (*2*), los cuales, al dividirse (primera división meiótica), originan los espermatocitos secundarios (*3*). Los espermatocitos secundarios, a su vez y a través de la segunda división meiótica, dan lugar a las espermátidas primitivas (*4*). Estas células no se dividen, pero experimentan un proceso de metamorfosis nuclear y citoplasmática denominado espermiogénesis (*4-9*), que origina los espermatozoides (*9*). La espermatogénesis del gallo es un proceso muy activo que evoluciona más rápidamente que en otras especies animales (12 días en el gallo frente a 32 días en la rata). Además de las células germinales, los túbulos seminíferos del testículo contienen las células de Sertoli (*S*). Estas células dividen el túbulo seminífero en dos compartimentos, un compartimento basal que contiene las espermatogonias y las primeras fases de diferenciación de los espermatocitos primarios y un compartimento luminal en el que se encuentran el resto de las células meióticas, las espermátidas y los espermatozoides. El microambiente creado por las células de Sertoli y el íntimo contacto existente entre estas células y las espermátidas es esencial para la espermiogénesis. Datos morfológicos obtenidos por I. Zlotnik, del departamento de zoología de la Universidad de Edimburgo.

tros por hora. Se trata de núcleos de menor diámetro con una cantidad de ADN aproximadamente igual al de las células somáticas (2,5 picogramos). Tales núcleos han sido identificados como pertenecientes a los espermatocitos primarios pequeños, espermatocitos secundarios y espermatogonias. El denominado estadio III corresponde a núcleos con velocidad de sedimentación de 0,8 milímetros por hora y contiene núcleos esféricos pequeños y núcleos de forma irregular. Su contenido de ADN representa la mitad del propio de las células somáticas. Estos núcleos pertenecen a las espermátidas redondas primitivas y a las fases iniciales de su diferenciación. El estadio IV corresponde a una fracción de núcleos alargados con velocidad de sedimentación de 0,5 milímetros por hora pertenecientes a las espermátidas alargadas y a los espermatozoides testiculares. Hemos designado como estadio V la fracción de núcleos de espermatozoides obtenidos del conducto deferente. Esta fracción sedimenta a la misma velocidad que lo hace la fracción nuclear de espermátidas alargadas y espermatozoides testiculares, es decir, a 0,5 milímetros por hora.

En relación con el contenido de ADN, la cantidad de proteínas básicas, proteínas no histonas y ARN varía a lo largo de la espermatogénesis del gallo. La relación entre las proteínas básicas y el ADN permanece constante (alrededor de la unidad) en los estadios iniciales, espermatogonias, espermatocitos y espermátidas primitivas, y desciende aproximadamente a la mitad en los estadios finales, espermátidas alargadas y espermatozoides. El contenido de proteínas no histonas permanece elevado en las espermatogonias y espermatocitos, inicia el descenso en las espermátidas primitivas, disminuyendo drásticamente en las espermátidas alargadas y espermatozoides. La cantidad de ARN varía paralelamente al contenido de proteínas no histonas [*véase la gráfica de la página 11*]. Provocando la lisis de los núcleos y lavándolos sucesivamente con disoluciones de concentraciones iónicas decrecientes, obtuvimos la cromatina correspondiente a las distintas fases de la diferenciación. El análisis de la composición de la cromatina mostró cambios similares a los observados en los núcleos. Estos resultados son comparables a los obtenidos por otros autores utilizando métodos citoquímicos en diferentes especies animales (crustáceos,



AISLAMIENTO Y PURIFICACION DE NUCLEOS de células testiculares del gallo. El testículo del gallo es un órgano intraabdominal y, a diferencia de lo que ocurre en los mamíferos, la espermatogénesis transcurre a la temperatura interna del animal (42 grados Celsius). Cuando alcanza su máximo desarrollo en primavera, el testículo pesa unos 25 gramos y contiene un extraordinario número de espermátidas (245×10^6 espermátidas por gramo). Inmediatamente después de sacrificar al animal se separan los testículos, se diseca la cápsula que los envuelve, se corta el tejido en pequeños fragmentos y se homogeiniza para romper las membranas celulares y liberar los núcleos. Los núcleos son separados del resto de los componentes celulares por ultracentrifugación a través de una disolución concentrada de sacarosa. Los conductos deferentes, a la derecha del esquema superior, son sometidos a los dos mismos procesos de homogeinización y ultracentrifugación para purificar los núcleos de los espermatozoides.

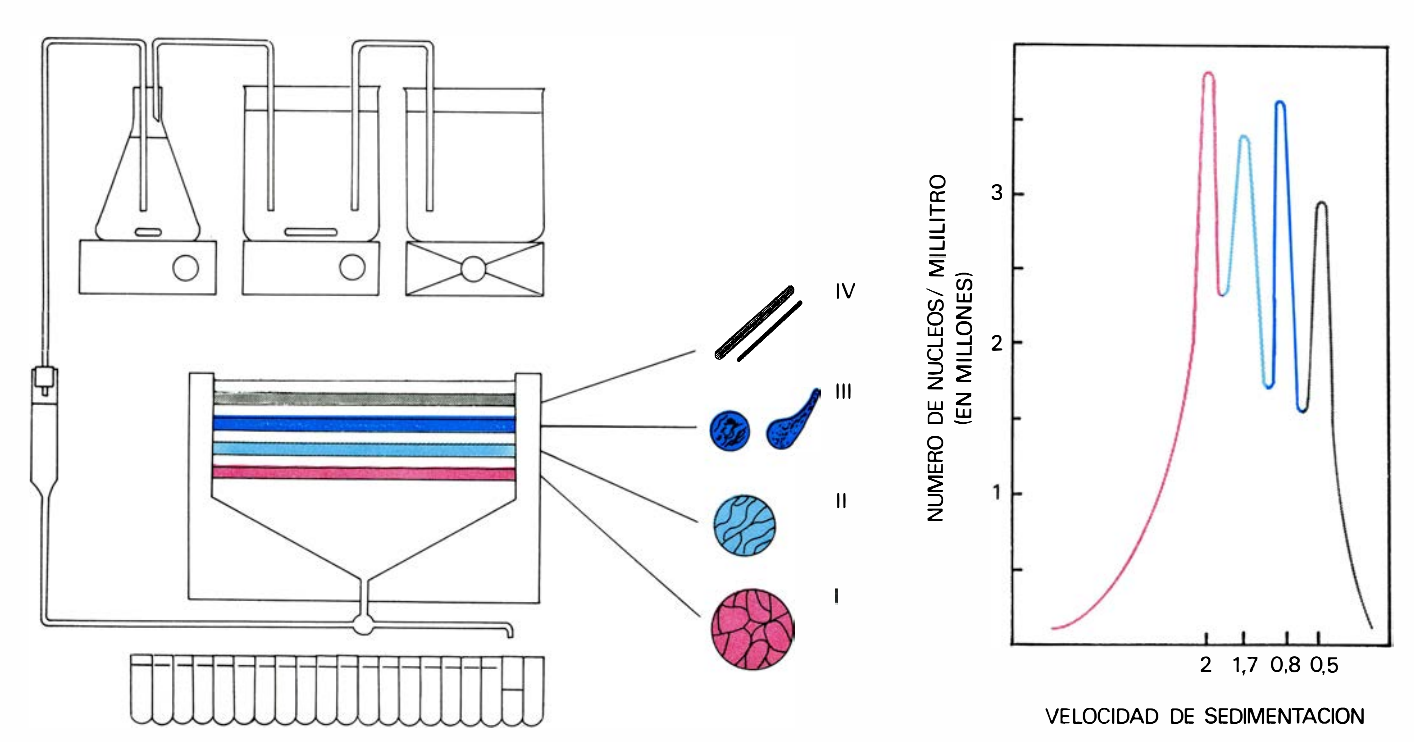
equinodermos, artrópodos, peces, anfibios y distintos mamíferos).

Para analizar cualitativamente las proteínas básicas de la cromatina a lo largo de la espermatogénesis del gallo, extrajimos dichas proteínas con ácido sulfúrico y las separamos por electroforesis en geles de poliacrilamida en presencia de urea. En estos geles, las proteínas básicas con diferente número de cargas positivas migran con velocidades distintas hacia el polo negativo. La fotografía de la página 12 muestra las bandas correspondientes a las 5 histonas (H1, H2B, H2A, H3 y H4) obtenidas de la cromatina de las células germinales en distintos estadios de diferenciación. La proporción de las diferentes histonas no se modifica a lo largo de la espermatogénesis. La histona H1 muestra varios subcomponentes con las movilidades electroforéticas características de esta especie. Componentes de menor movilidad que la histona H1 están presentes en la fracción correspondiente a las espermátidas alargadas. Otro cambio aparente en la electroforesis de las histonas en estas células es una banda de menor movilidad electroforética que las dos bandas H4. La concentración de este componente aumenta durante la espermiogénesis a expensas de las dos bandas H4 presentes en los estadios anteriores. La heterogeneidad electroforética de la histona H4 ha sido atribuida a diferentes grados de acetilación de la molécula.

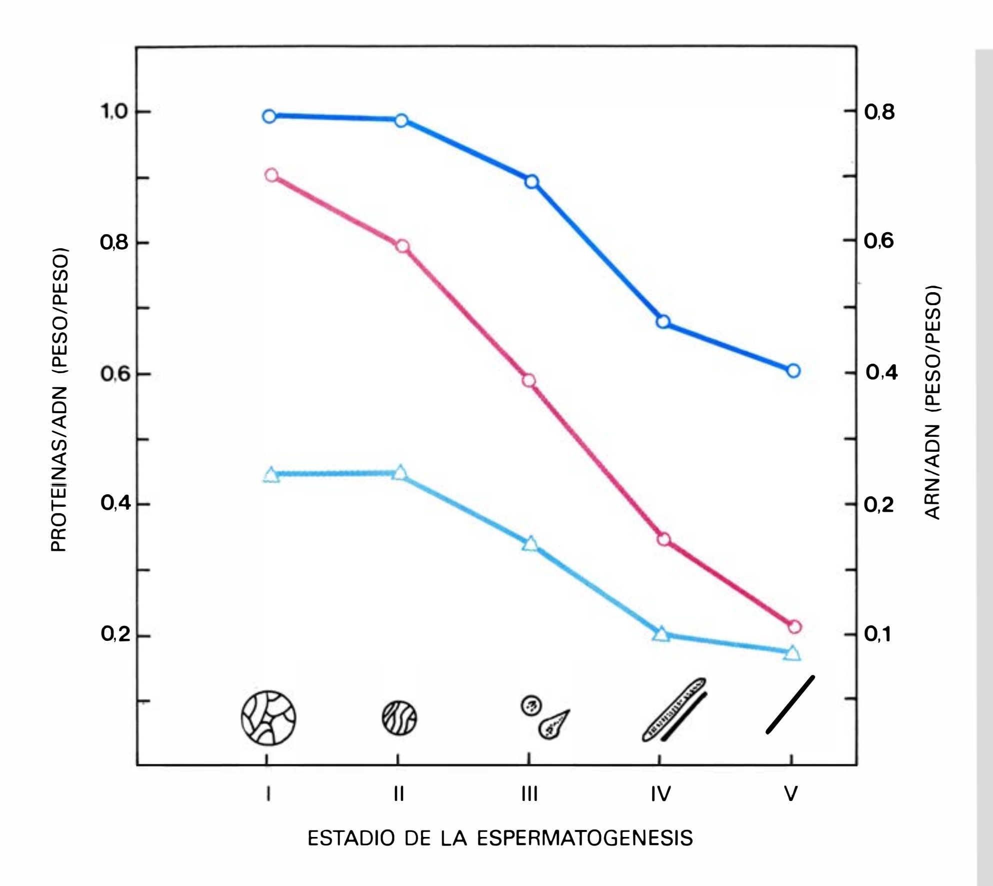
El patrón electroforético de las proteínas básicas de las espermátidas alargadas muestra, además de las histonas citadas, una proteína básica con una movilidad electroforética mucho mayor [*véase la ilustración de la página 13*]. Dicha banda corresponde a la protamina del gallo. En la misma figura puede observarse que, en los espermatozoides obtenidos del vaso deferente, la protamina es la única proteína básica de la cromatina, no existiendo histonas. M. Nakano, T. Tobita y T. Ando, del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chiva, Japón, estudiaron la protamina del gallo, consiguiendo aislar, entre los años 1970 y 1975, ocho componentes distintos, y secuenciar varios de ellos. Cuando aislamos la protamina del gallo en 1974, sospechamos que la heterogeneidad electroforética demostrada por aquellos autores podía ser un artefacto atribuible a proteolisis, por lo que tratamos de inhibir la actividad proteolítica y, al conseguirlo, logramos aislar la protamina del gallo intacta. Utilizando el mismo procedimiento independientemente, T. Ando y colaboradores confirmaron nuestro resultado y obtuvieron para la citada protamina la secuencia de aminoácidos que se muestra en la página 14.

Para investigar los cambios cualitativos que experimentan las proteínas no histonas de la cromatina durante la espermatogénesis, disociamos estas moléculas del complejo cromatínico y las analizamos electroforéticamente. Las proteínas de la cromatina pueden disociarse disolviéndolas con la ayuda de un detergente de carga negativa, el dodecil sulfato sódico. Una vez disociadas las distintas cadenas polipeptídicas quedan recubiertas con las cargas negativas del detergente y pueden separarse en el campo eléctrico creado a través de un gel de poliacrilamida. Las moléculas migran hacia el polo positivo a través de los poros del gel con velocidades que dependen de sus pesos moleculares.

En el laboratorio del Departamento de Biología Celular del Baylor College of Medicine en Houston, Texas, en colaboración con Ching Sung Teng, analizamos por el procedimiento citado las proteínas de la cromatina de las células germinales del gallo en distintos estadios de diferenciación. En la ilustración de la página 15 se muestra el resultado de tal análisis. Las bandas existentes en los estadios iniciales (es-



SEPARACION DE NUCLEOS de células testiculares de gallo por el método de la velocidad de sedimentación a fuerza de gravedad unidad. El sistema de separación consta esencialmente de un formador de gradientes, representado en la parte superior del esquema y de una cámara de sedimentación cilindrocónica. La suspensión nuclear se introduce en la cámara de sedimentación a través de la jeringa representada a la izquierda del esquema, y es seguida de inmediato por el gradiente de sacarosa. La muestra forma una delgada capa en la superficie del gradiente y los núcleos sedimentan espontáneamente con velocidades tanto mayores cuanto mayor es el volumen nuclear. Después de 3 o 4 horas de sedimentación, se obtienen cuatro capas (una por velocidad), representadas aquí en distintos colores, que son recogidas y caracterizadas por criterios morfológicos y de composición química.

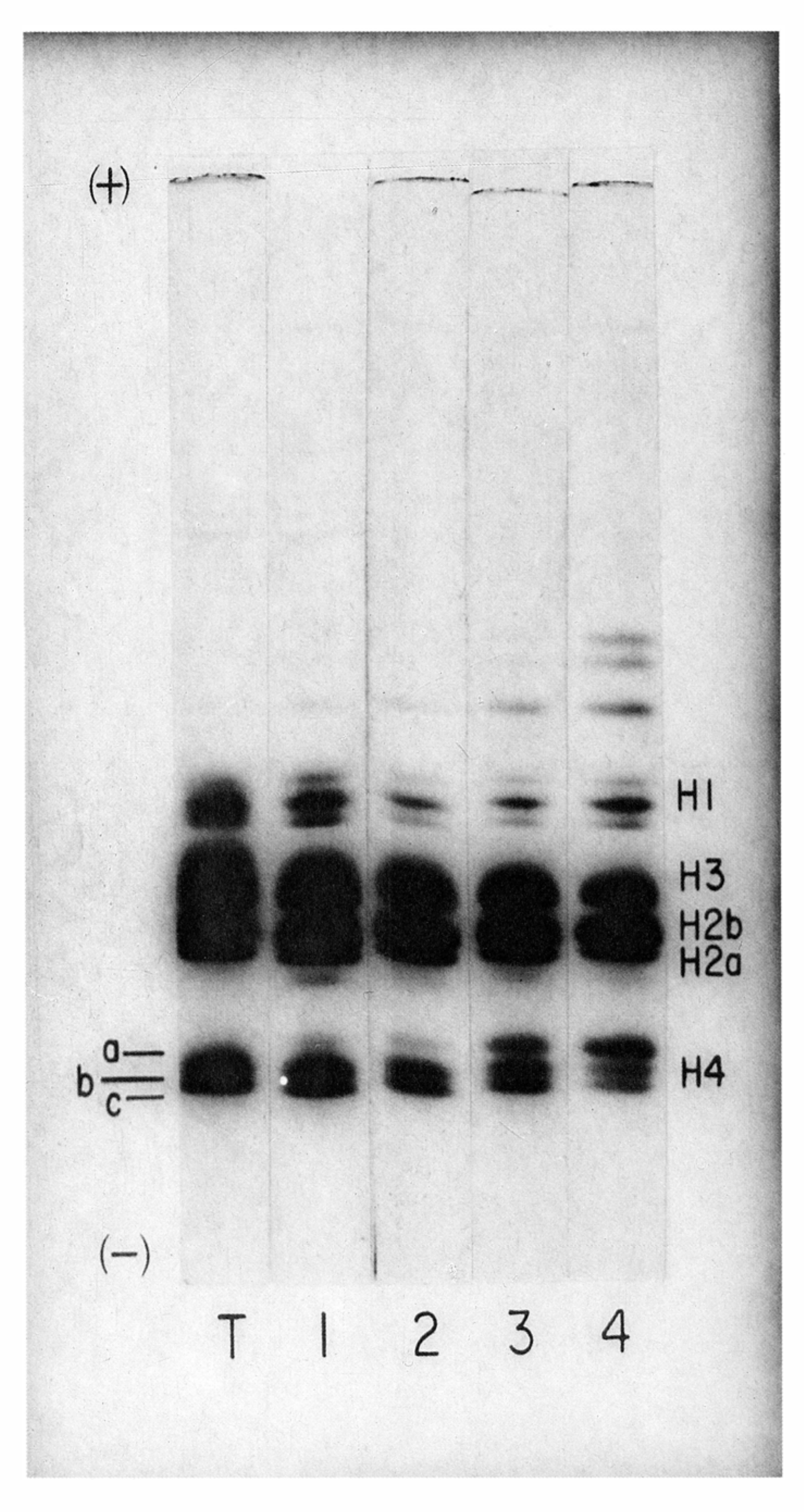


COMPOSICION QUIMICA DE LOS NUCLEOS aislados de células testiculares del gallo en distintos estadios de diferenciación. La cantidad de proteínas básicas (*azul intenso*), proteínas no histonas (*rosa*) y de ácido ribonucleico (*en color azul pálido*) desciende a medida que avanza la espermatogénesis.

permatogonias y espermatocitos) son muy similares. En estas células existe una considerable heterogeneidad en las bandas de elevado peso molecular (80.000-200.000). En las espermátidas primitivas, cuatro bandas de elevado peso molecular y las bandas de pesos moleculares 72.000, 52.000, 40.000 y 28.000 muestran menor densidad. En las espermátidas alargadas, doce componentes de elevado peso molecular y tres bandas de peso moleculares 80.000, 74.000 y 40.000 disminuyen drásticamente, mientras que cuatro cadenas polipeptídicas de pesos moleculares 86.000, 70.000, 68.000 y 46.000 aumentan. En los espermatozoides, sólo son visibles 5 bandas, cuyos pesos moleculares se hallan comprendidos entre 36.000 y 70.000.

En experimentos llevados a cabo anteriormente, entre 1972 y 1974, en el Laboratorio de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona, en colaboración con S. Vidal-Sivilla, obtuvimos por cromatografía en hidroxilapatita las proteínas no histonas de núcleos de células testiculares de cobayo, previamente separados por velocidad de sedimentación unidad. Observamos que la mayoría de proteínas no histonas de la cromatina de las células testiculares del cobayo con pesos moleculares superiores a los 75.000 dalton eran características de las espermatogonias y espermatocitos. En las espermátidas se observó la desaparición de las bandas de elevado peso molecular y una reducción considerable de las bandas comprendidas entre los pesos moleculares 32.000 y 42.000. Los espermatozoides mostraron una ulterior reducción de las proteínas no histonas. L. S. Hnilica y colaboradores, de la Universidad de Texas en Houston, obtuvieron resultados similares con células de testículos de rata separadas por el método de velocidad de sedimentación unidad. Las proteínas de peso molecular superior a 84.000 eran características de los espermatocitos y desaparecían juntó a las bandas de pesos moleculares 53.000 y 31.000 en las espermátidas.

¿Qué relación existe entre los cambios observados en las proteínas de la cromatina y la actividad genética de las distintas células germinales? Para investigar esta relación, estudiamos la síntesis de ácido ribonucleico durante la espermatogénesis del gallo. Para detectar dicha síntesis en las diferentes células germinales, incuba-



HISTONAS extraídas de la cromatina de núcleos pertenecientes a células testiculares de gallo en distintos estadios de diferenciación (I a IV). Las histonas fueron separadas por electroforesis en geles de poliacrilamida en presencia de urea. El gel de la izquierda (*T*) muestra el patrón obtenido con las histonas extraídas del embrión de pollo de 11 días y se ha utilizado como referencia. Obsérvese asimismo el cambio registrado en la intensidad de las bandas H4 (*b, c*) en las espermátidas y la aparición de un componente adicional con menor movilidad electroforética (*a*), como consecuencia probable de la acetilación.

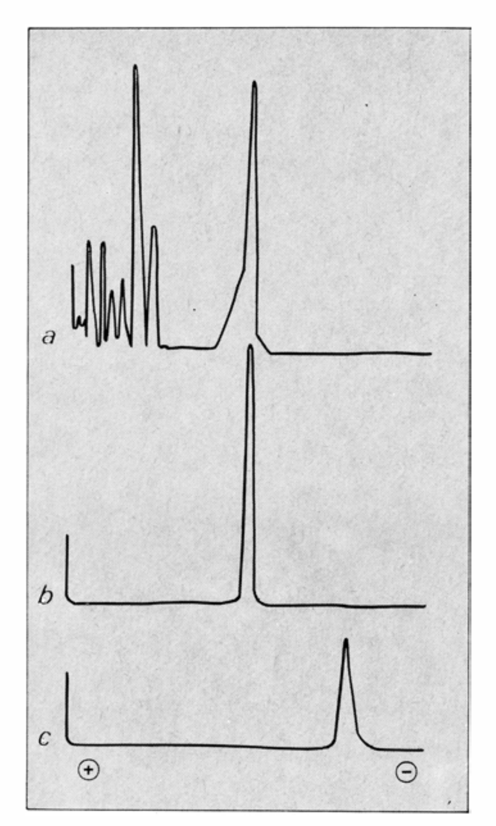
mos las células in vitro con un precursor del ácido ribonucleico, la uridina marcada con tritio. Determinamos luego la cantidad de ácido ribonucleico radiactivo presente en los diferentes tipos nucleares separados por el método de velocidad de sedimentación unidad. Otro procedimiento utilizado consistió en aislar primero los núcleos y determinar después su capacidad para sintetizar ARN a partir de los correspondientes nucleótidos. También incubamos pequeños fragmentos de tejido testicular con uridina tritiada, determinando ulteriormente por autorradiografía el ácido ribonucleico radiactivo existente en los núcleos.

Los distintos métodos mostraron que la síntesis del ARN ocurre en los núcleos de las espermatogonias, espermatocitos y espermátidas primitivas del gallo, y cesa cuando los núcleos de las espermátidas inician la metamorfosis que dará lugar a los espermatozoides. No hay, pues, síntesis de ARN en los núcleos de las espermátidas alargadas y de los espermatozoides [*véase la ilustración de la página 16*]. Observaciones similares han sido realizadas en distintas especies animales. Una mención especial merecen los estudios llevados a cabo por A. L. Kierszenbaum y Laura T. Tres, en el Laboratorio de Biología de la Reproducción de la Universidad de Carolina del Norte, en Chapel Hill. Estos investigadores visualizaron el proceso de síntesis de ARN con el microscopio electrónico. Las espermatogonias, los espermatocitos y las espermátidas redondas del ratón sintetizan ARN. Las moléculas de ARN aparecen en múltiples puntos de la cromatina de las células meióticas y premeióticas y sólo en algunos puntos de las espermátidas primitivas. No se observó síntesis de ARN desde el momento en que las espermátidas inician el proceso de diferenciación a espermatozoides.

La presencia de proteínas no histonas en los núcleos de células germinales activas en la transcripción y su ausencia en fases avanzadas de la espermiogénesis, donde cesa toda actividad genética, es un hecho constante en la espermatogénesis de diversas especies. En las células genéticamente activas, las proteínas no histonas podrían desempeñar distintas funciones en el proceso de la síntesis del ácido ribonucleico nuclear heterogéneo y en la formación, transporte y estabilización de los ácidos ribonucleicos mensajeros.

El cese de la actividad genética en las

espermátidas podría relacionarse con la pérdida de las proteínas no histonas de la cromatina. Cuando esta pérdida tiene lugar, todos los ácidos ribonucleicos mensajeros responsables de la diferenciación celular ya han sido sintetizados. El genoma de las espermátidas desprovisto de la mayoría de las proteínas no histonas características de los estadios precedentes queda convertido en una *tabula rasa* que sólo será objeto de nueva programación específica durante la embriogénesis. Le Stourgeon y colaboradores, del Departamento de Biología Molecular de la Universidad de Vanderbilt en Nashville, Tennessee, han demostrado que la transición de células genéticamente activas a células genéticamente inertes en distintos modelos experimentales comporta la desaparición de las proteínas no histonas de elevado peso molecular, la disminución de un componente de peso molecular 52.000, posiblemente tubulina, y el incremento de una banda de peso molecular 46.000 identificada como actina. Las proteínas que forman parte de las partículas que contienen el ARN nuclear heterogéneo desaparecen.



PROTAMINA DEL GALLO separada por electroforesis en geles de poliacrilamida en presencia de urea. Los núcleos de las espermátidas alargadas (estadio IV) contienen histonas y protamina (*a*). Los núcleos de los espermatozoides aislados del conducto deferente contienen únicamente protamina (*b*). El trazado inferior corresponde a la protamina del salmón (*c*), utilizada de referencia.

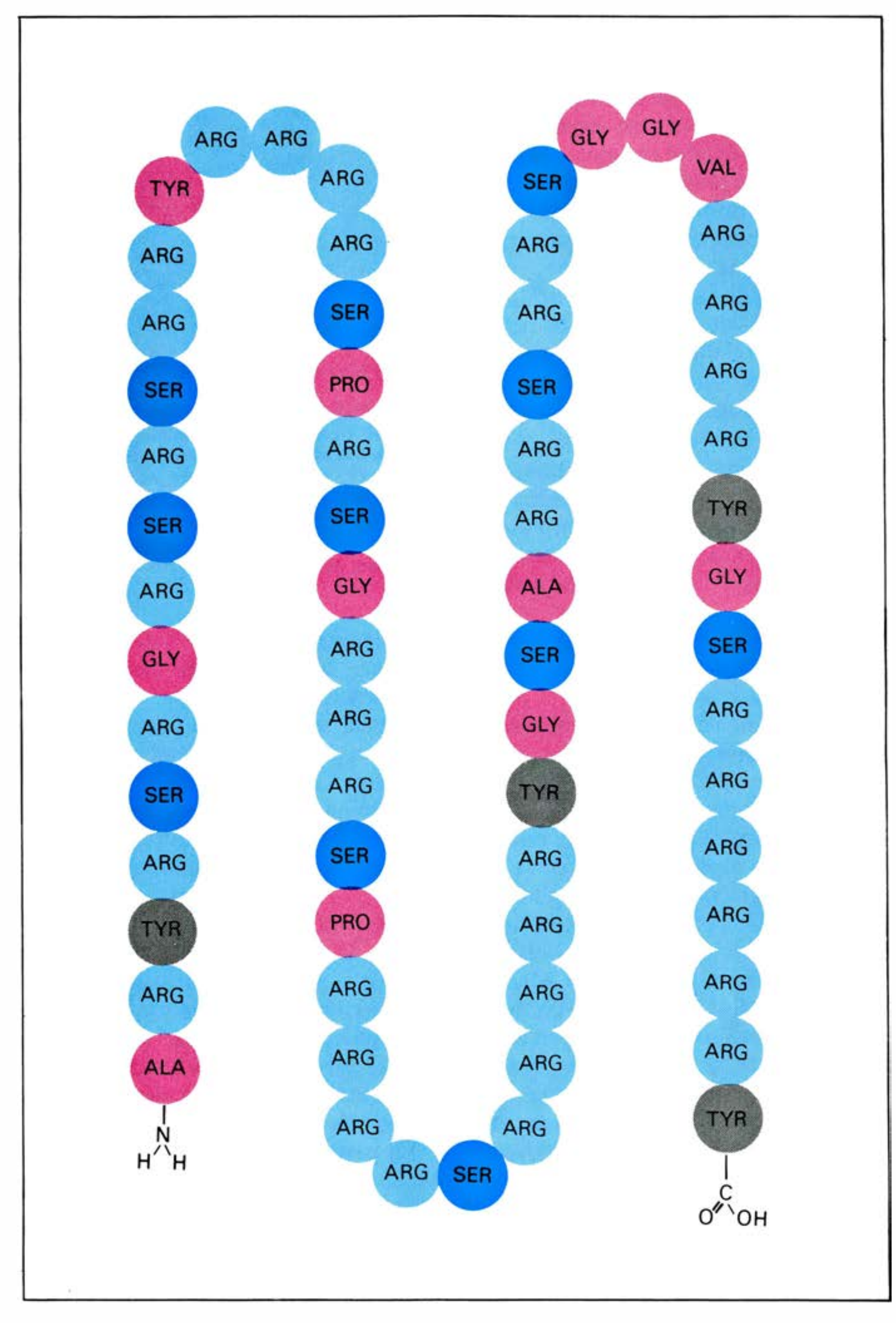
Para investigar la relación existente entre las proteínas no histonas y la expresión genética, resulta imprescindible caracterizar individualmente dichas proteínas y establecer la posible relación entre ellas y los procesos de replicación, transcripción y recombinación genética. Una proteína no histona, posiblemente relacionada con el fenómeno de la recombinación genética en las células meióticas del lirio, fue aislada y caracterizada por Y. Hotta y H. Stern, del Departamento de Biología de la Universidad de California en San Diego. Dicha proteína se unía con gran afinidad al ADN de una sola cadena y facilitaba el proceso de apertura y cierre de la doble hélice. En 1971, en el Departamento de Química Macromolecular de la Universidad Politécnica de Barcelona, investigamos, en colaboración con J. A. Subirana, la presencia de una proteína similar en las células germinales de la gónada macho de equinodermos del género Holoturia. La proteína se encontraba en las células germinales, pero no era detectable en un tejido somático de los mismos animales. Y. Hotta y H. Stern extendieron sus observaciones a distintos mamíferos, incluido el hombre, y demostraron que la proteína en cuestión estaba presente únicamente en los espermatocitos, pero no en otras células testiculares o en células somáticas.

En muchas especies animales, además de la pérdida de proteínas no histonas y del cese de la actividad genética, se produce en las espermátidas una intensa reorganización de la estructura de la cromatina. En efecto, las histonas responsables del empaquetamiento del ADN en todas las células del organismo son desplazadas del núcleo de las espermátidas y su lugar lo ocupa una nueva proteína altamente básica, la protamina [*véase arriba*]. El complejo ADN-protamina (nucleoprotamina) tiene un grado de compactación mucho mayor que el complejo ADN-histonas (nucleohistona). ¿Cómo ocurre la transición de una a otra forma de empaquetamiento?

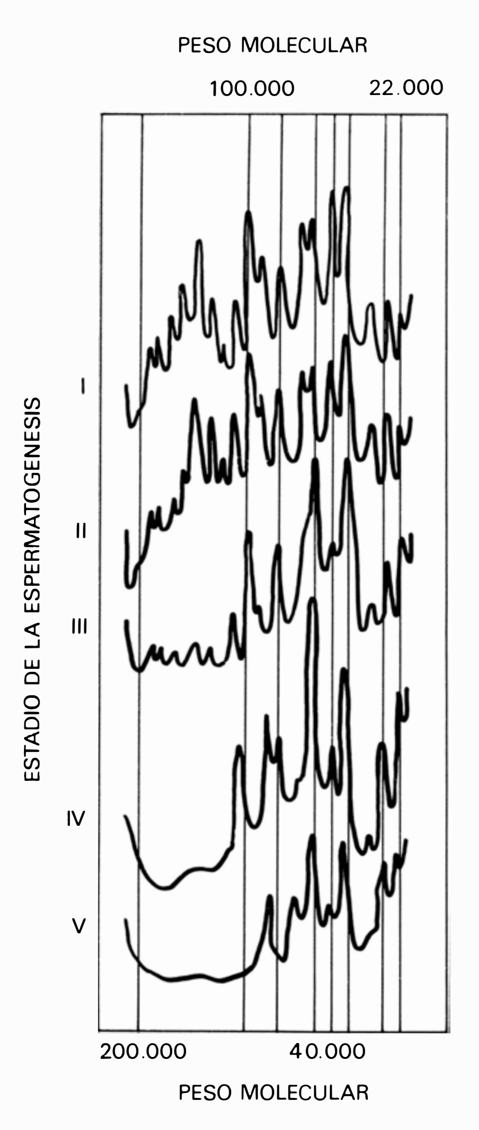
La pérdida de proteínas nucleares y las modificaciones químicas que éstas experimentan antes de ser desplazadas podrían dar lugar a la exposición de sitios del ADN bloqueados en estadios anteriores de la espermatogénesis. Para investigar esta posibilidad inyectamos actinomicina D radiactiva en testículos de gallo in vivo y determinamos la cantidad de actinomicina que se unía a la cromatina de las diferentes células

germinales. La unión de la actinomicina es proporcional al número de sitios del ADN expuestos en la cromatina. La gráfica de la página 17 muestra cómo el incremento de unión de la actinomicina D está en relación con la pérdida de proteínas de la cromatina en fases sucesivas de la espermatogénesis del gallo. La unión de actinomicina D es máxima en las espermátidas alargadas, donde, en relación con los estadios precedentes, la cantidad de proteínas de la cromatina es mínima.

Por un método totalmente distinto, llegamos a la misma conclusión. Preparamos ARN polimerasa bacteriana y calculamos el número de sitios donde la polimerasa puede iniciar la síntesis de ARN en la cromatina de diferentes células germinales. El máximo número de sitios de iniciación y, por tanto, la máxima exposición del ADN, correspondía a las espermátidas alargadas. Nótese que no existe relación entre el número de sitios de iniciación para la síntesis de ARN in vitro por la polime-



SECUENCIA DE AMINOACIDOS de la protamina del gallo. De los 65 aminoácidos que la componen, 38 son argininas y están distribuidas a lo largo de la molécula, dispuestas en grupos de 2, 3, 4, 5 y hasta 6 residuos. La secuencia ha sido obtenida por T. Ando y colaboradores, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chiva, Japón. Intercaladas entre las argininas, hay 11 serinas. G. H. Dixon y colaboradores, de la Universidad de British Columbia, en Canadá, demostraron que la fosforilación de las serinas y su defosforilación juegan un papel importante en la unión de la protamina al ADN.

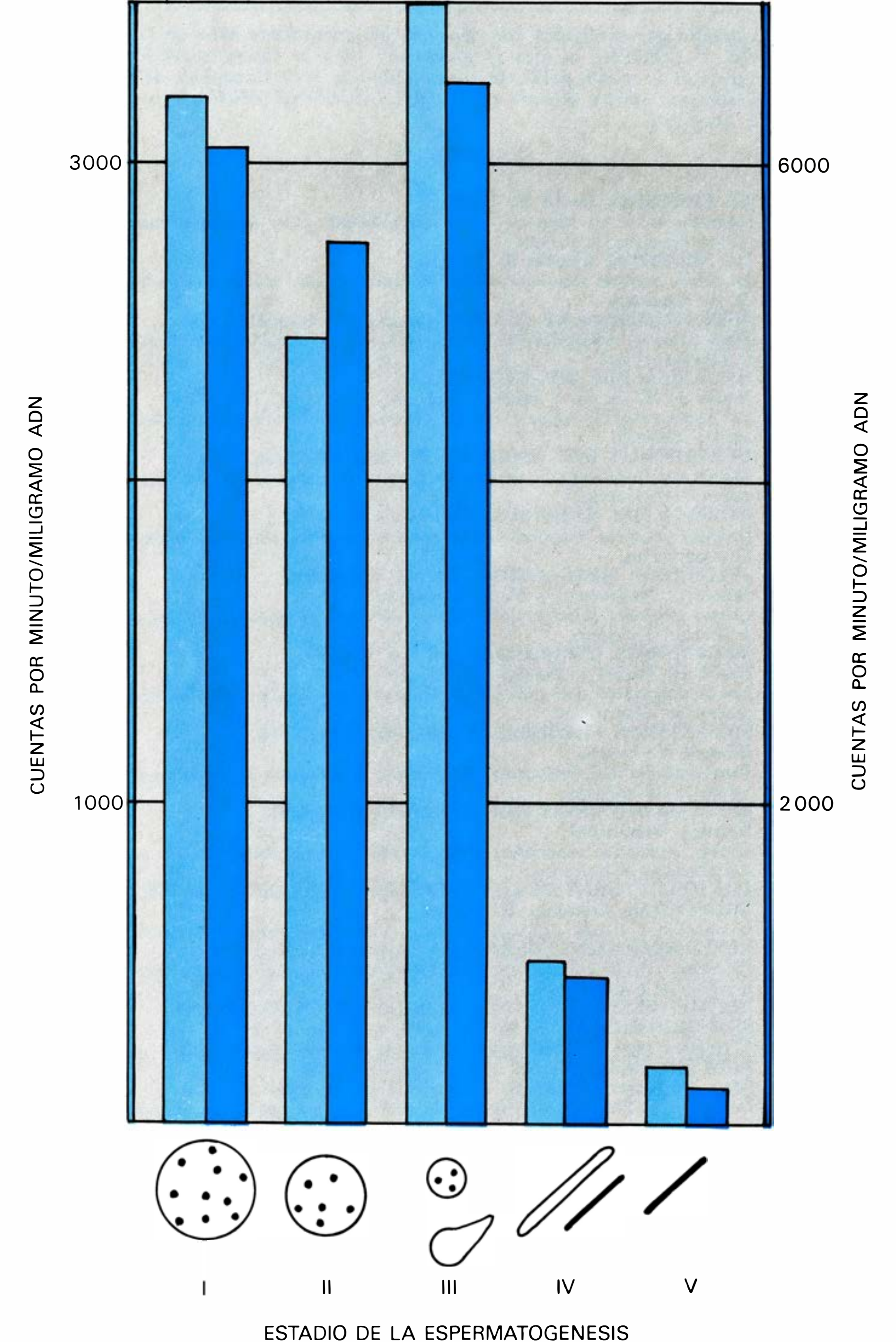


PROTEINAS NO HISTONAS extraídas de la cromatina de núcleos pertenecientes a células testiculares de gallo en diferentes estadios de diferenciación (I a V). El trazado corresponde al análisis densitométrico de las bandas obtenidas en geles de poliacrilamida en presencia del detergente dodecilsulfato sódico. Se aprecia una notable reducción en la complejidad del patrón electroforético a medida que avanza la espermatogénesis.

rasa bacteriana y la síntesis de ARN que tiene lugar in vivo, pues en estas células no hay transcripción nuclear. Estudiamos, además, la afinidad de las diferentes cromatinas hacia la polimerasa bacteriana, así como la cinética de la unión polimerasa cromatina. Estos estudios y los realizados con la ARN polimerasa eucariótica de germen de trigo demostraron que una parte del ADN de la cromatina de las espermátidas se comporta como el ADN aislado y desprovisto de proteínas. La exposición del ADN en las espermátidas ha sido también observada por métodos citoquímicos.

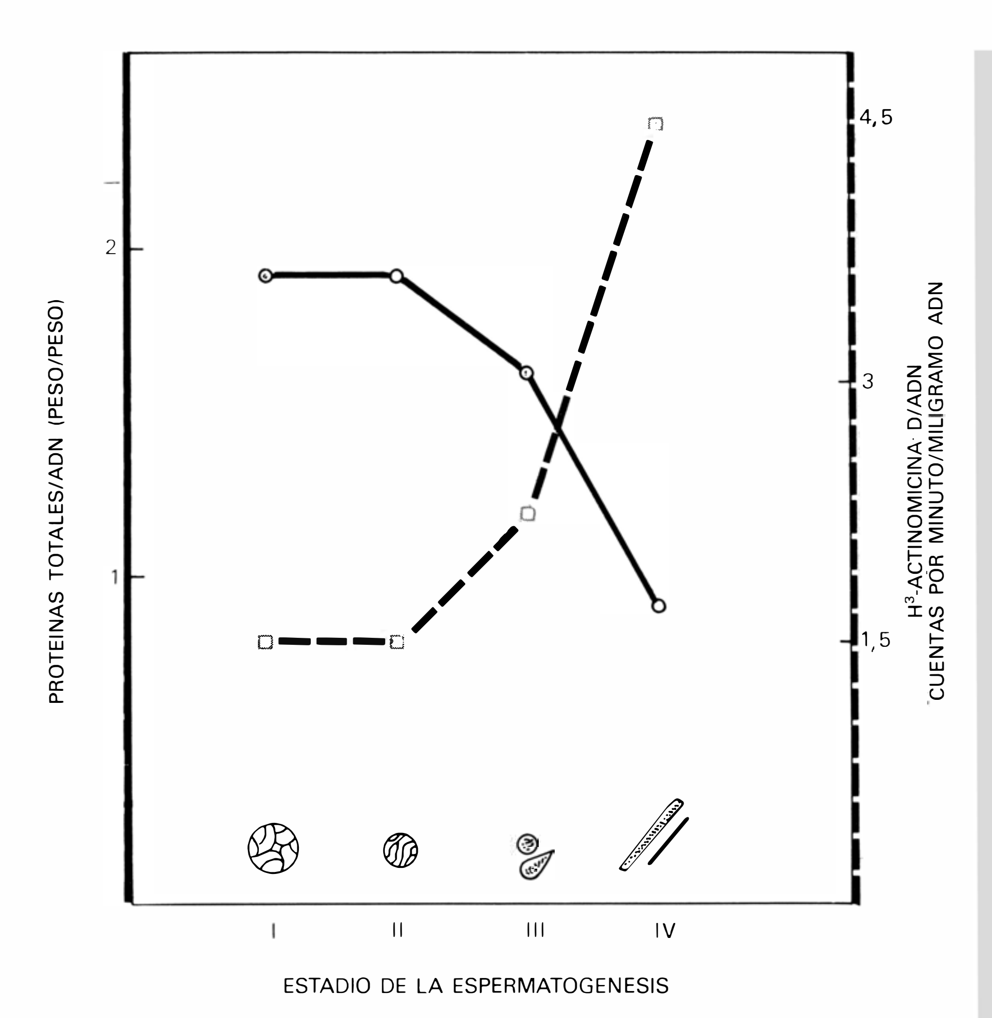
Nuestras investigaciones revelaron que el proceso de transición de nu-

cleohistona a nucleoprotamina no suponía un bloqueo progresivo de sitios del ADN expuestos en estadios previos de la espermatogénesis, como habían propuesto otros autores, sino que el proceso tenía lugar en dos fases. En una fase inicial, que podríamos denominar de desempaquetamiento de la nucleohistona, se producía una mayor exposición del ADN en la cromatina de las espermátidas, mientras que en la fase final del empaquetamiento de la nucleoprotamina tendría lugar un bloqueo total del ADN en el núcleo de los espermatozoides. Esta hipótesis planteaba dos interrogantes: por una parte, ¿qué mecanismos protegen al ADN expuesto de las espermátidas frente a las distintas agresiones del medio que pueden alterar el mensaje genético de estas células? Las radiaciones ionizantes, diversos agentes químicos con potencial mutagénico y las nucleasas ejercen su acción en regiones de la cromatina donde la estructura del complejo nucleoproteico determina una mayor accesibilidad al ácido nucleico. La segunda cuestión era la siguiente: ¿cómo es posible desempaquetar la nucleohistona manteniendo el ADN en un estado relativamente compacto, dado el reducido volumen nuclear de las espermátidas? Debe tenerse en cuenta que el ADN es una molécula rígida, cuyas cadenas se aproximan difícilmente por la repulsión eléctrica de los grupos fosfato cargados negativamente y, en condiciones normales, tiende a la expansión, no a la compactación. Un problema similar se plantea en el empaquetamiento del ADN en la cabeza de los bacteriófagos. En algunos de estos virus, el problema se ha resuelto por la presencia de las poliaminas naturales espermina y espermidina. La espermina, con cuatro cargas positivas, y la espermidina con tres, neutralizan los grupos fosfato del ADN, dan flexibilidad a la molécula y contrarrestan su tendencia a la expansión. Crean, por tanto, las condiciones propicias para la compactación del ADN. Además, las poliaminas ejercen sobre el ADN bacteriano y en la cromatina de los organismos superiores una potente acción antimutágena.



SINTESIS DE ACIDO RIBONUCLEICO determinada por incubación in vitro de fragmentos de tejido testicular de gallo en presencia de tritio-uridina (*azul claro*) y por incubación de núcleos de células testiculares en presencia de ^{3}H-UTP (*azul intenso*). La síntesis de ARN es elevada en los estadios iniciales (I, II y III) en comparación con las fases finales de la espermatogénesis (IV y V). El punteado de los núcleos indica la incorporación de ácido ribonucleico-uridina detectada por autorradiografía. No se observa síntesis de ARN en los núcleos de las espermátidas que han iniciado el proceso de elongación.

La función protectora de las poliaminas y su función estructural podrían constituir la respuesta a los dos interrogantes planteados anteriormente. En el año 1977 postulamos como hipótesis de trabajo que las poliaminas naturales podían jugar un papel esencial en la transición nucleohistona–nucleoprotamina [*véase la ilustración de la página 18*]. Los análisis revelaron la presencia de poliaminas, especialmente espermina, en los núcleos de las espermátidas del gallo. Los sistemas enzimáticos requeridos para su síntesis se encuentran probablemente en las células de Sertoli, según los resultados de las investigaciones realizadas en la rata por Roger W. Turkington y colaboradores, del St. Luke's Hospital Research Foundation en Milwaukee, Wisconsin, y de nuestras propias investigaciones en el gallo. Es conocida la íntima relación entre las células de Sertoli y las espermátidas [*véase la ilustración de la página 8*], por lo que los autores citados postularon la posi-

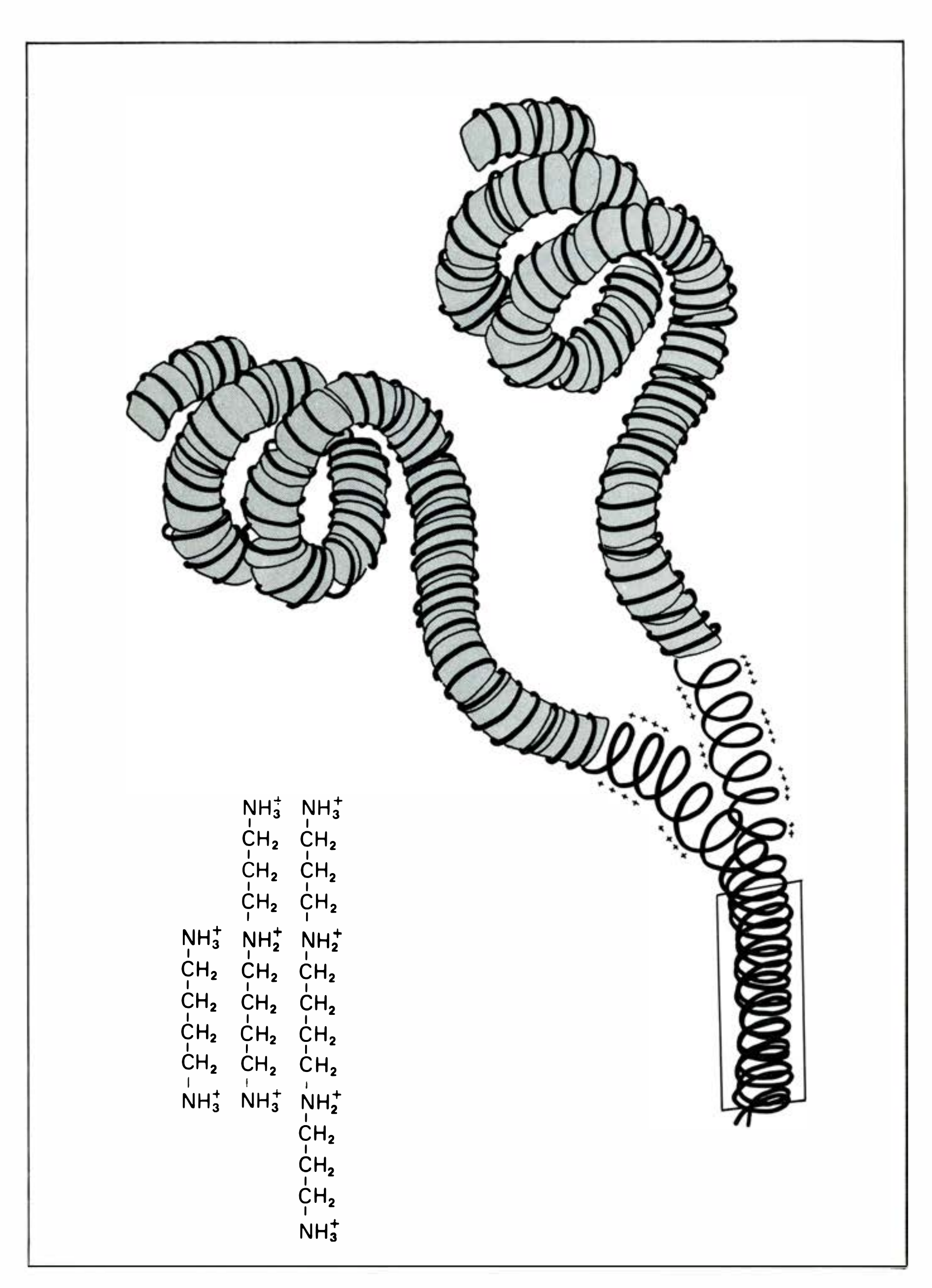


EL GRADO DE EXPOSICION DEL ADN en la cromatina de las células testiculares del gallo puede determinarse midiendo su capacidad de unión de actinomicina D. Existe una relación inversa entre la cantidad de proteína de una determinada cromatina y la cantidad de actinomicina D que se une al ácido desoxirribonucleico. La unión de actinomicina D es máxima en las espermátidas alargadas (estadio IV), donde la cantidad total de proteínas (proteínas básicas y proteínas no histonas) detectada es mínima.

ble transferencia de poliaminas desde la célula de Sertoli a las espermátidas. La actividad del primer enzima de la cadena biosintética de las poliaminas, la ornitindescarboxilasa, aumentaría por la acción de la hormona FSH sobre las células de Sertoli.

En experimentos realizados in vitro, concentraciones de espermina superiores a 2 milimolar inhibían la síntesis de ARN en una mezcla de ARN polimerasa de germen de trigo y cromatina de células germinales. Las mismas concentraciones inhibían completamente la acción de las nucleasas sobre la cromatina. Las poliaminas podrían, pues, bloquear in vivo los sitios de iniciación para la síntesis de ARN y proteger al ADN expuesto frente a la acción de las nucleasas y otros agentes.

Aún no conocemos el mecanismo mediante el cual son desplazadas las histonas y proteínas no histonas de la cromatina de las espermátidas. Actualmente, en el Laboratorio de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona, estamos investigando, en colaboración con J. Mezquita y S. Vidal-Sivilla, algunos de los procesos implicados en dicho desplazamiento. Uno de estos fenómenos consiste en la acetilación de las histonas, modificación química al parecer necesaria para el desempaquetamiento de la nucleohistona en las espermátidas. La acetilación supone la neutralización de determinadas cargas positivas de las histonas y, en consecuencia, la disminución de la interacción entre estas moléculas y el ADN. A diferencia de lo que ocurre en las células germinales genéticamente activas, en las que hemos detectado actividades enzimáticas de acetilación y desacetilación de las histonas, con un recambio rápido de los grupos acetilo, en las espermátidas, si bien está presente la actividad acetilasa, la actividad desacetilasa es muy pequeña o no existe, por lo que el recambio de los grupos acetilo es prácticamente nulo. Hemos observado, además, que la espermina ejerce un



LA TRANSICION NUCLEOHISTONA-NUCLEOPROTAMINA tiene lugar en las espermátidas alargadas del gallo. El esquema superior muestra cómo la transición de una a otra forma de empaquetamiento supondría la exposición de sitios del ácido desoxirribonucleico (ADN) como consecuencia del desplazamiento, previa acetilación, de las proteínas de la cromatina. Las poliaminas naturales, fundamentalmente la espermina y la espermidina, mantendrían el ADN en un estado de compactación relativa y lo protegerían mientras tiene lugar el empaquetamiento definitivo en forma de nucleoprotamina. Las fórmulas químicas correspondientes a las poliaminas espermina, espermidina y putrescina con 4, 3 y 2 cargas positivas, respectivamente, se han representado a la izquierda del esquema.

notable efecto estimulante sobre la actividad acetilasa de la cromatina, mientras que a elevadas concentraciones inhibe la actividad desacetilasa. El incremento de la concentración de poliaminas en el núcleo de las espermátidas podría explicar la intensa acetilación de las histonas que precede a su desplazamiento.

Cuando las histonas han sido reemplazadas por la protamina, el ADN del espermatozoide del gallo queda totalmente inaccesible a la actinomicina D y a la ARN polimerasa y muestra un grado de compactación comparable al del ADN de la cabeza de los bacteriófagos.

El ADN de los espermatozoides, en estas condiciones, puede afrontar la aventura de salir al medio externo en busca del óvulo sin riesgos de alteración del mensaje genético que transporta. Su volumen diminuto y su forma altamente hidrodinámica le permitirán realizar el desplazamiento con la máxima economía energética.

Multiplicación génica y resistencia a fármacos

Los experimentos sobre la adquisición de resistencia a fármacos en cultivos de células de mamíferos sirven de modelo de laboratorio para explicar el mecanismo por el que aparecen genes duplicados en el curso de la evolución

Robert T. Schimke

A medida que los organismos han evolucionado de formas simples a otras más complejas se ha incrementado su genoma (dotación completa de genes de un ser vivo); dicho aumento se ha registrado en la cantidad de material genético, ADN, y en el número de genes. Se cree que este fenómeno evolutivo se debe principalmente a la multiplicación génica, proceso en virtud del cual se duplica una pequeña parte del genoma, uno o más genes, en un determinado punto del cromosoma. Las técnicas más modernas de la biología molecular relacionadas con la obtención de ADN recombinante artificial han descubierto numerosos ejemplos de este fenómeno. Se ha observado que algunos genes están representados por múltiples copias (algunas veces hay 400 copias por célula); estos genes idénticos suelen concentrarse en un mismo cromosoma, formando las llamadas agrupaciones de genes ("gene clusters"). En otros casos, esos genes multiplicados han sufrido mutaciones en sus componentes químicos básicos, a raíz de lo cual los enzimas u otros tipos de proteínas que ellos codifican muestran ligeras alteraciones. Los grupos de genes similares que conforman este tipo reciben el nombre de familias de multigenes.

Los genes multiplicados pueden hallarse estrechamente ligados en un solo cromosoma o bien pueden localizarse en diferentes cromosomas. Cabe deducir, pues, que los genes multiplicados pueden translocarse, es decir, pasar de un cromosoma a otro. La recurrencia de estos tres procesos genéticos fundamentales –multiplicación, mutación y translocación– en generaciones sucesivas de células produce, a lo largo del tiempo evolutivo, genomas más complejos y, en última instancia, organismos más complejos.

Aunque estos procesos no han cesado de operar en el curso de la evolución, no se ha investigado a fondo la frecuencia con que se producen ni los mecanismos moleculares y bioquímicos implicados. Claro está que no pueden estudiarse en el laboratorio procesos que se presentan con una frecuencia baja en millones de años. Sin embargo, últimamente, varios grupos de investigadores, entre ellos el del autor y sus colegas, de la Universidad de Stanford, han estudiado el mecanismo por el que células de mamífero cultivadas en el laboratorio adquieren resistencia a ciertos fármacos; puede demostrarse que en este proceso está implicada la multiplicación génica. Ese fenómeno sirve a su vez de modelo experimental para estudiar cómo la multiplicación génica influye en la evolución y cómo células individuales, tejidos multicelulares (por ejemplo tumores) e incluso organismos llegan a hacerse resistentes a diversos fármacos (insecticidas y antibióticos incluidos). Uno de los descubrimientos más sorprendentes de esta investigación fue la alta incidencia de multiplicación génica en cultivos de células de mamífero, lo que sugiere la existencia de un potencial de cambio en el genoma mucho mayor que el que se había supuesto.

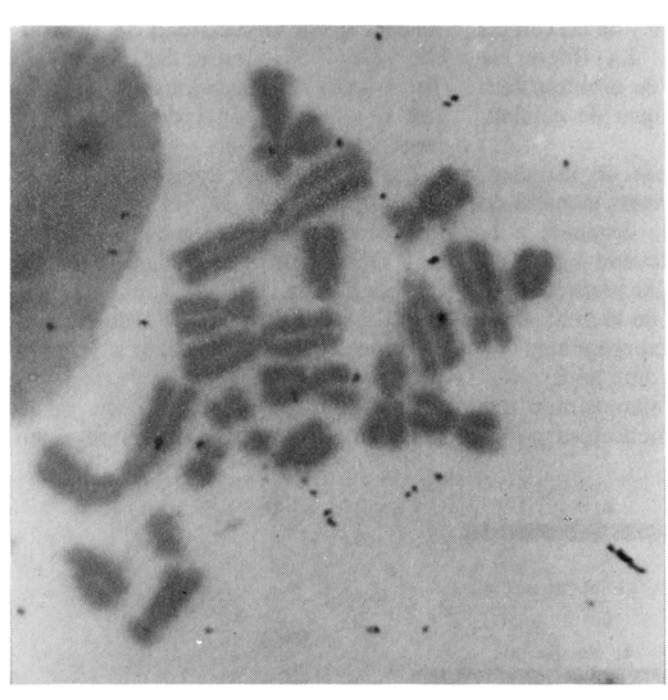
En nuestro laboratorio hemos investigado concretamente el mecanismo a través del cual células de ratón y de hámster, en cultivo, adquieren resistencia al metotrexato, agente quimioterapéutico utilizado en el tratamiento del cáncer humano. El metotrexato es un análogo del ácido fólico vitamínico (conocido también por vitamina B_C). Este fármaco mata las células cancerosas al unirse fuertemente al enzima dihidrofolato reductasa en el mismo sitio en el que debería enlazarse el sustrato normal, el dihidrofolato. La unión del metotrexato bloquea la conversión del dihidrofolato en tetrahidrofolato. Se requiere tetrahidrofolato en el metabolismo de la producción de moléculas precursoras, esenciales para la síntesis de ADN y proteínas, por lo que su ausencia, al impedir el crecimiento de las células, ocasiona su muerte.

Desde hace tiempo, viene usándose metotrexato en el tratamiento de varias formas de cáncer. Pero se ha demostrado que tales células malignas pueden adquirir resistencia al fármaco. Por esta razón, los investigadores han estudiado durante las dos últimas décadas, en cultivos de células animales, varios mecanismos posibles de adquisición de resistencia al metotrexato. Se han identificado tres de ellos. Consiste uno en la alteración del enzima dihidrofolato reductasa, probablemente a consecuencia de una mutación en el ADN de las células, que da lugar a una reducción de la afinidad, normalmente elevada, del metotrexato por el enzima; en este caso el enzima no sufriría inhibición. El segundo mecanismo posible consiste en una alteración, de nuevo se supone que resultante de una mutación, de una proteína de membrana implicada en el transporte del metotrexato; las células no absorberían el fármaco ni tampoco se inhibiría el enzima. La tercera posibilidad estriba en un incremento de la cantidad total de dihidrofolato reductasa en las células; aunque en este caso el enzima se inhibiría a cualquier concentración de metotrexato que hubiera en el medio de cultivo, tendríamos un exceso de enzima con respecto a la concentración del fármaco en las células y, por tanto, parte del enzima quedaría libre (es decir, no inhibido) para llevar a cabo la conversión del dihidrofolato en tetrahidrofolato. Este

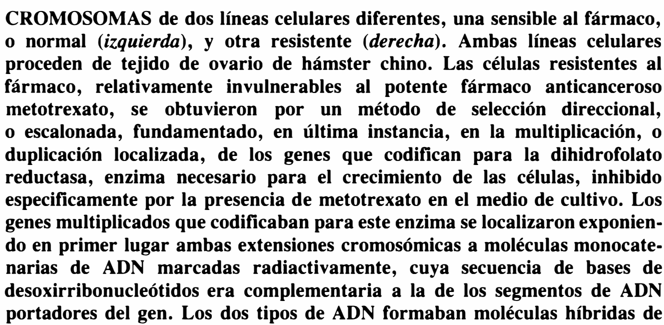
último mecanismo ha sido objeto de nuestro estudio.

Por un procedimiento denominado de selección direccional o escalonada obtuvimos células resistentes al metotrexato con altos niveles de dihidrofolato reductasa. Si se cultivan células en presencia de concentraciones bajas de metotrexato, las células mueren; pero hay excepciones, que podemos redondear en una de cada 100.000 células, que sobreviven y crecen. Estas células, resistentes a bajas concentraciones de metotrexato, poseen un nivel elevado de dihidrofolato reductasa. Si las cultivamos luego en presencia de concentraciones de metotrexato algo más elevadas, de nuevo se degenerará la mayoría de ellas y sólo unas cuantas sobrevivirán y crecerán. Estas, con reforzada resistencia al fármaco ahora, poseen niveles de enzima aún más elevados. Repitiendo el proceso por medio de selección sucesiva en concentraciones de metotrexato progresivamente mayores, se llega a obtener células de gran resistencia al metotrexato, portadoras de un nivel muy alto de dihidrofolato reductasa.

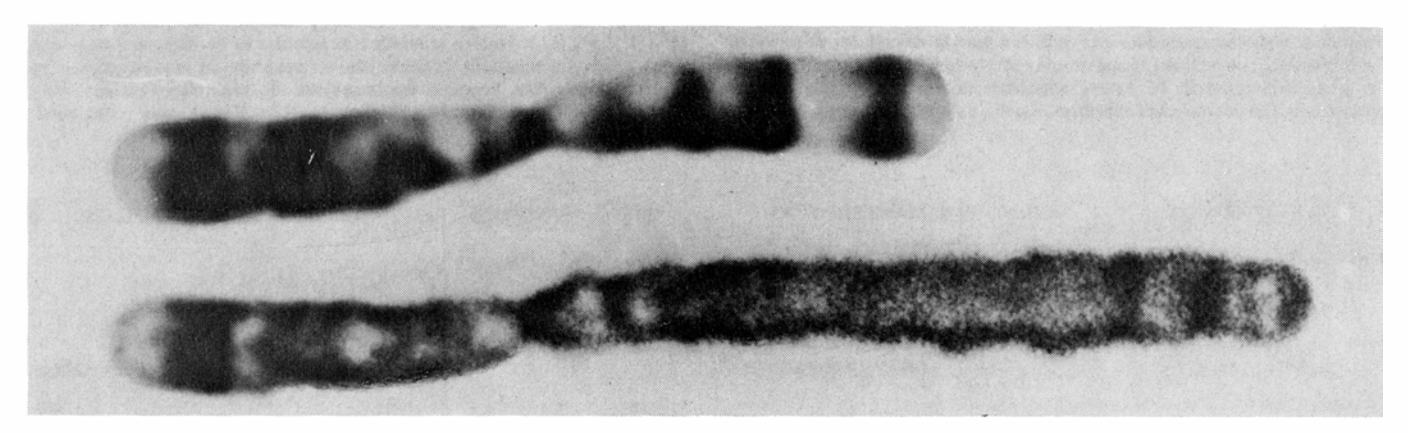
Importa destacar que este proceso es







CROMOSOMAS de dos líneas celulares diferentes, una sensible al fármaco, o normal (*izquierda*), y otra resistente (*derecha*). Ambas líneas celulares proceden de tejido de ovario de hámster chino. Las células resistentes al fármaco, relativamente invulnerables al potente fármaco anticanceroso metotrexato, se obtuvieron por un método de selección direccional, o escalonada, fundamentado, en última instancia, en la multiplicación, o duplicación localizada, de los genes que codifican para la dihidrofolato reductasa, enzima necesario para el crecimiento de las células, inhibido específicamente por la presencia de metotrexato en el medio de cultivo. Los genes multiplicados que codificaban para este enzima se localizaron exponiendo en primer lugar ambas extensiones cromosómicas a moléculas monocatenarias de ADN marcadas radiactivamente, cuya secuencia de bases de desoxirribonucleótidos era complementaria a la de los segmentos de ADN portadores del gen. Los dos tipos de ADN formaban moléculas híbridas de doble cadena en los segmentos complementarios del cromosoma, fijándose de este modo el marcador radiactivo. Después de la hibridación lavábamos el portaobjetos que contenía los cromosomas para eliminar la mayor parte del ADN complementario radiactivo no hibridado y seguidamente lo recubríamos de una emulsión fotográfica. La energía de la radiación emitida bastaba para impresionar la emulsión en el punto exacto en el que se había fijado el ADN complementario marcado (*puntos negros*). En los cromosomas de células sensibles al fármaco no se distingue la localización de los genes que codifican para el enzima. En los cromosomas de células resistentes al fármaco, en cambio, la marca radiactiva que indica la situación de los genes multiplicados que codifican para la dihidrofolato reductasa aparece concentrada en una región determinada del brazo largo de uno de los cromosomas, el denominado cromosoma número 2 (porque es el segundo cromosoma en longitud en esta línea celular). Micrografías de R. Schimke, de la Universidad de Stanford.



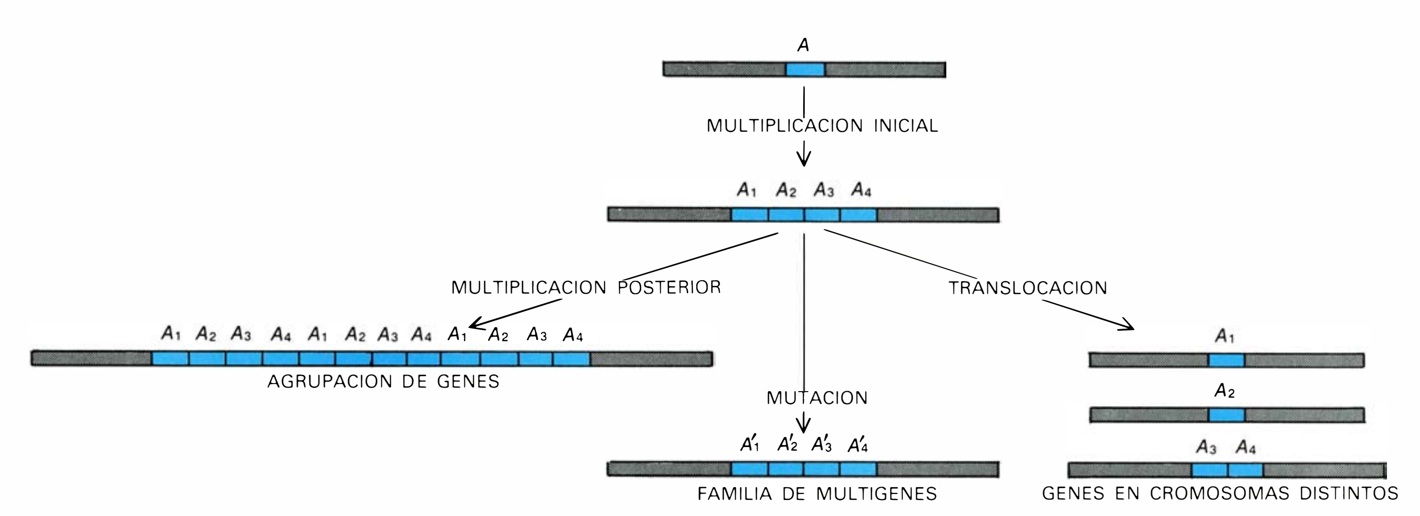
CROMOSOMAS NUMERO 2 de una célula sensible al fármaco (*arriba*) y de otra resistente al mismo (*abajo*). Los cromosomas, que proceden en ambos casos de células de ovario de hámster chino, se tiñeron al objeto de que quedara de manifiesto su modelo de bandas característico. La diferencia más notable entre los dos cromosomas reside en la región dilatada del brazo largo del cromosoma procedente de la célula resistente al fármaco. Se cree que es esta región, que se distingue por su tinción homogénea (no presenta las bandas típicas de los cromosomas normales), la que alberga los aproximadamente 150 genes repetidos que codifican para el enzima dihidrofolato reductasa en la línea celular resistente. Micrografía de Chasin y Urlaub.

equivalente a un mecanismo de selección darwiniana, ya que la mayoría de las células mueren en cada una de las etapas que jalonan el mismo. La presión de selección en este caso es mucho mayor que la esperada en cualquier proceso evolutivo normal que afecte a los mamíferos (aunque quizá sí se alcance parecida presión selectiva cuando los insectos sufren una lluvia masiva de insecticida). El procedimiento experimental puede parangonarse a un proceso de selección natural en el que una población de 10 millones de organismos se redujera a 100, estos se multiplicasen hasta alcanzar de nuevo los 10 millones, que a su vez se quedarían en 100 individuos y así durante muchas generaciones.

El nivel de dihidrofolato reductasa en las células seleccionadas puede llegar a ser hasta 400 veces más elevado que en las células normales sensibles al metotrexato. Ese enzima puede constituir por sí solo hasta el cinco por ciento de toda la fracción proteica sintetizada por la célula. Esta conclusión se apoya en pruebas de electroforesis en gel en dos dimensiones, técnica que separa las proteínas en razón de su tamaño, en una dirección, y en razón de su carga eléctrica neta, en la otra dirección. Mediante esta técnica, capaz de separar hasta 1000 proteínas celulares distintas, hemos observado una sola diferencia importante entre los modelos proteicos bidimensionales de las células sensibles al metotrexato y de las células resistentes al mismo. La diferencia estriba en la cantidad de dihidrofolato reductasa de ambos tipos de células.

A través de una serie de estudios, basados en las últimas técnicas de la biología molecular, llegamos a la conclusión de que el elevado contenido en enzima de las células resistentes al metotrexato resultaba de la multiplicación génica. Tales experimentos no habrían sido posibles diez años atrás. En primer lugar, obteníamos muestras purificadas de ARN mensajero portador de la información necesaria para la síntesis de la dihidrofolato reductasa de células con un elevado nivel de enzima. Con el ARN mensajero purificado sintetizábamos un ADN complementario marcado radiactivamente. Este paso depende del enzima transcriptasa inversa, que se obtiene a partir de ciertos virus tumorales cuyo material hereditario es ARN. (Por el descubrimiento de este enzima, Howard M. Temin, de la Universidad de Wisconsin, y David Baltimore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, recibieron el premio Nobel de fisiología y medicina en 1975.)

En la reacción catalizada por la transcriptasa inversa, el ARN sirve de molde para la síntesis de una cadena de ADN con una secuencia de bases de desoxirribonucleótidos complementaria a la secuencia de bases de ribonucleótidos del ARN. Debido a la complementaridad de las bases de nucleótidos de uno y otro tipo de ácido nucleico, las dos moléculas se unen



MULTIPLICACION GENICA y evolución. La multiplicación de ciertos genes desempeña un papel importante en la evolución al aumentar la cantidad total de material genético (ADN) y el número de determinados genes de los cromosomas de cada célula. En este diagrama esquemático, el gen *A* es un segmento de ADN cromosómico que incorpora una secuencia específica de bases de desoxirribonucleótidos que codifican para la síntesis de una proteína determinada. La repetición inicial de este gen produce cuatro copias idénticas de la misma secuencia de bases, alineadas en una región dilatada del cromosoma. Los cuatro genes repetidos, A_1, A_2, A_3 y A_4, pueden multiplicarse a su vez, produciendo agrupaciones de genes múltiples compuestas por hasta 400 copias del mismo gen. Por otro lado, cada uno de los genes amplificados de la serie original de cuatro puede sufrir independientemente una mutación en su secuencia de bases, dando lugar a la síntesis de proteínas ligeramente alteradas; las series de genes de este tipo, diferentes aunque relacionados (A'_1, A'_2, A'_3, A'_4), reciben el nombre de familias de multigenes. Los cuatro genes originales repetidos también pueden pasar de un cromosoma a otro (translocación). Los procesos fundamentales de multiplicación, mutación y translocación producirán, finalmente, organismos más complejos.

GRUPO PTERIDINICO | GRUPO PARAMINOBENZOATO

ACIDO FOLICO

GRUPO PTERIDINICO | GRUPO PARAMINOBENZOATO

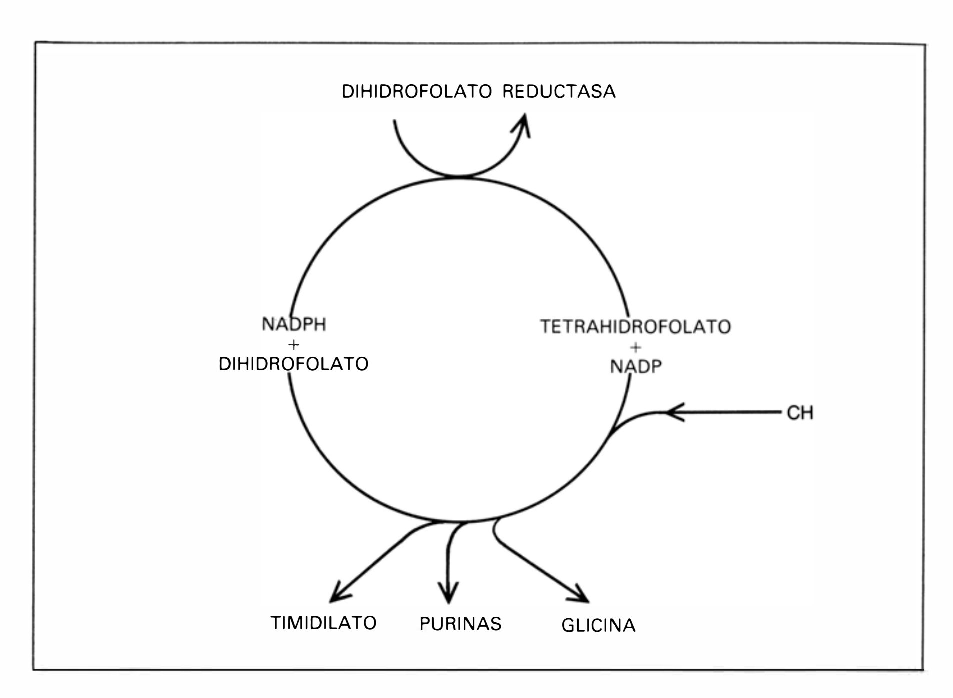
METOTREXATO

METOTREXATO, fármaco utilizado por el autor y sus colegas, de la Universidad de Stanford, en el estudio de la adquisición de la resistencia a fármacos en cultivos de células de mamífero. Se trata de un análogo del ácido fólico (vitamina B_C). Se distingue de la vitamina por tener un grupo amino ($-NH_3$) en lugar de un grupo hidroxilo ($-OH$) en la posición número 4 del primer anillo pteridínico de la molécula y un grupo metilo ($-CH_3$) en lugar de un átomo de hidrógeno (H) unido a un átomo de nitrógeno en el grupo paraminobenzoato de la molécula. Las sustituciones se destacan en color a la derecha. El metotrexato se administra desde hace tiempo como agente quimioterapéutico en el tratamiento de varias formas de cáncer humano.

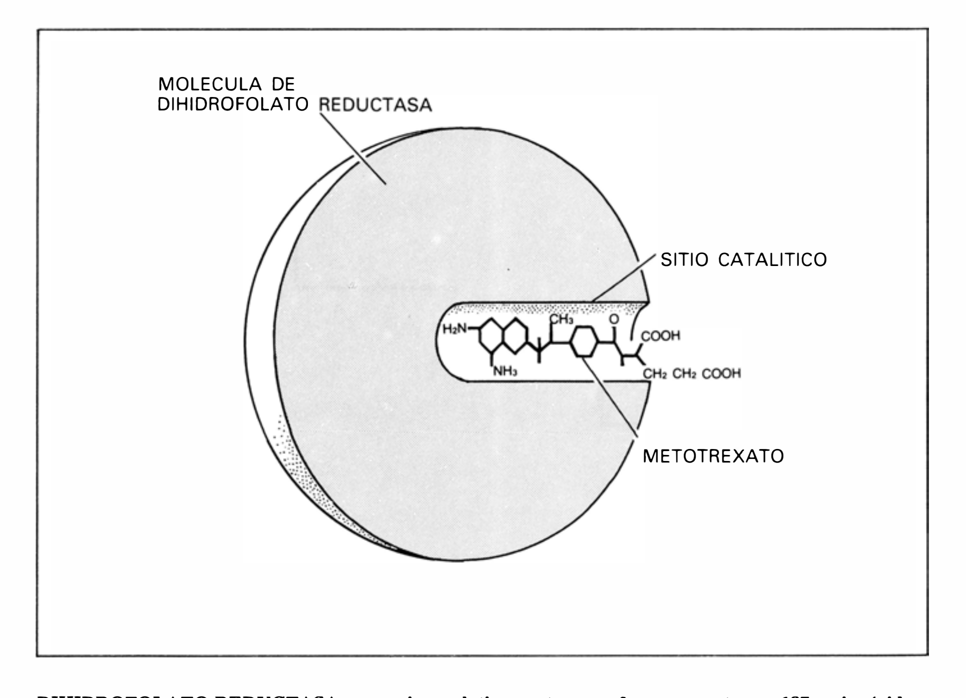
estrechamente y forman un híbrido ARN-ADN. El ARN mensajero, que codifica para la síntesis de una proteína determinada, posee una única secuencia lineal de bases de nucleótidos. Por consiguiente, la hibridación entre el ADN complementario y la secuencia para la dihidrofolato reductasa podía usarse para detectar y medir la cantidad de ARN mensajero que codificaba para este enzima. De igual forma, el ADN complementario para la dihidrofolato reductasa puede hibridarse específicamente con las secuencias de desoxirribonucleótidos del ADN celular que codifican normalmente para la dihidrofolato reductasa, en otras palabras, los genes reales que codifican para este enzima. Por tanto, el ensayo de hibridación también podía emplearse para identificar y cuantificar los genes que codificaban para la dihidrofolato reductasa en el genoma de las células.

Es relativamente fácil detectar los híbridos complementarios ARN-ADN o ADN-ADN con la ayuda de otro enzima, la nucleasa S_1, que destruye cualquier molécula de ARN o ADN monocatenaria sin afectar a las moléculas de ADN complementario hibridadas al ARN o al ADN celulares. En un experimento de este tipo se mide estrictamente la cantidad de radiactividad presente en el híbrido ARN-ADN o ADN-ADN. (El ADN complementario es radiactivo, pues se sintetiza a partir de unidades de desoxirribonucleósido-trifosfatos marcados radiactivamente.)

Para determinar el número de genes se fragmenta el ADN celular en trozos pequeños, se desnaturalizan las cadenas dobles (separándolas en cadenas sencillas) por calentamiento a 100 grados Celsius y se añade a la mezcla una pequeña cantidad de ADN complementario, marcado radiactivamente, bajo condiciones experimentales en las que este ADN pueda hibridarse con cualquier otro con el que tenga secuencias de nucleótidos complementarias. A intervalos irregulares, se toman muestras de la mezcla de reacción, se digieren con el enzima S_1 y se mide la radiactividad resistente a la digestión (es decir, la radiactividad retenida en un híbrido). Obviamente, cuantas más secuencias de ADN puedan reaccionar con el ADN complementario, más rápida será la velocidad de hibridación. De aquí que, al medir la velocidad de hibridación entre el ADN complementario radiactivo que codifica para la dihidrofolato reductasa y el ARN o el ADN de las células con distintos niveles de enzima, pueda determinarse



EN EL METABOLISMO DE LA CELULA interviene el ácido fólico en una serie de reacciones químicas en las que la transferencia de un grupo con un único átomo de carbono (−CH) produce moléculas precursoras esenciales para la síntesis de los ácidos nucleicos y las proteínas; los ejemplos incluyen el timidilato (necesario para la síntesis de ADN), varias purinas (para la síntesis de ADN y ARN) y la glicina (para la síntesis proteica). La forma activa del ácido fólico implicada en estas reacciones de transferencia de un carbono es el tetrahidrofolato, forma reducida del ácido en la que hay cuatro átomos de hidrógeno extra en el segundo anillo pteridínico (*en las posiciones números 5, 6, 7 y 8*). Cuando se transfiere el grupo −CH al precursor, el tetrahidrofolato se convierte en dihidrofolato (mediante eliminación de dos átomos de hidrógeno). Un elemento clave del proceso es el enzima dihidrofolato reductasa, que convierte el dihidrofolato en tetrahidrofolato con la ayuda de otro importante producto que interviene en el metabolismo de la célula, la forma reducida del fosfato nicotinamida-adenín-dinucleótido, o NADPH.



DIHIDROFOLATO REDUCTASA, un enzima relativamente pequeño, compuesto por 187 aminoácidos. Esta proteína se halla plegada formando una estructura más o menos esférica que recuerda una bola de boliche con un solo orificio para los dedos. El hueco es el sitio catalítico al que se unen normalmente las moléculas de dihidrofolato y las de NADPH para la transferencia de dos átomos de hidrógeno del NADPH al dihidrofolato, con producción de tetrahidrofolato. El metotrexato mata las células cancerosas al inhibir específicamente la dihidrofolato reductasa; dado que su estructura es muy parecida a la del dihidrofolato, las moléculas de metotrexato se acoplan al sitio catalítico del enzima en el mismo punto donde se uniría la molécula de dihidrofolato. La unión del metotrexato al enzima es más fuerte, por lo que el fármaco impide la reducción del dihidrofolato a tetrahidrofolato. La inhibición por el metotrexato de la acción catalítica de la dihidrofolato reductasa bloquea el crecimiento de la célula y es causa de su muerte.

tanto la cantidad de ARN mensajero como el número de genes.

La técnica descrita de hibridación de ácidos nucleicos nos ha revelado, fundamentalmente, que a un incremento del nivel de dihidrofolato reductasa en las células seleccionadas corresponde un incremento paralelo del nivel de ARN específico, incremento que, a su vez, obedece a un aumento del número de genes de dihidrofolato reductasa en las células. En resumen, se trata de un proceso de multiplicación génica; una multiplicación selectiva, pues la cantidad total de ADN por célula no sube de forma significativa. Hemos examinado muchas líneas de cultivos celulares procedentes de tejidos de ratón y de hámster; en todos los casos hemos observado una buena correlación entre el incremento del nivel del enzima y el número de copias génicas.

Aunque nuestros estudios fueron los primeros en demostrar de manera concluyente que la multiplicación génica tenía lugar bajo condiciones experimentales en células de mamíferos, este fenómeno ya se conocía desde hacía tiempo en bacterias. Así, hace unos diez años, William R. Folk y Paul Berg, de la Universidad de Stanford, estudiaron una cepa de laboratorio de la bacteria intestinal *Escherichia coli* que requería el aminoácido glicina para desarrollarse. Aunque la bacteria no podía sintetizar este aminoácido, crecía perfectamente cuando se añadía glicina al medio de cultivo. A partir de esta cepa bacteriana, Folk y Berg obtuvieron una cepa mutante que se desarrollaba con dificultades en presencia de glicina. Descubrieron que esa mutación afectaba a la capacidad del enzima glicil ARNt-sintetasa para catalizar el primer paso de la incorporación de la glicina en una cadena proteica; según observaron, el enzima tenía poca afinidad por la glicina.

Folk y Berg buscaron luego derivados de la cepa bacteriana mutante que pudieran crecer rápidamente en un medio que contuviera pequeñas cantidades de glicina. Pronto obtuvieron tales bacterias y observaron que, en vez del esperado cambio adicional en el enzima, poseían más cantidad del enzima defectuoso. Concluyeron que la secuencia de ADN que codificaba para el enzima defectuoso había aumentado. Así pues, las bacterias mutantes veían limitada su capacidad de crecimiento rápido por una deficiencia enzimática; las bacterias seleccionadas eran las que habían extendido esta secuencia de ADN, produciendo células que podían crecer con mayor celeridad.

Fue a partir de entonces cuando John R. Roth, de la Universidad de Utah, se empeñó en investigar la multiplicación de los genes que codifican para el aminoácido histidina en la bacteria *Salmonella typhimurium*, filogenéticamente muy próxima a la anterior. Y ha llegado a la conclusión siguiente: aunque las duplicaciones génicas al azar son también frecuentes en este organismo, suelen ser inestables y se detectan sólo si las bacterias se mantienen en condiciones de crecimiento adecuadas para seleccionar la retención de un determinado gen multiplicado.

Nuestra hipótesis de trabajo acerca de la multiplicación de los genes que codifican para la dihidrofolato reductasa de células de mamífero cultivadas se funda en una analogía con las multiplicaciones observadas en bacterias. Para nosotros, algunas secuencias de ADN (portadoras de genes específicos) se multiplican de continuo, y, en segundo lugar, esas multiplicaciones pueden afectar a cualquier secuencia de ADN. Las multiplicaciones suelen ser inestables, razón por la cual pasan frecuentemente desapercibidas. Por otra parte, si las células se encuentran en condiciones tales que la baja cifra de células portadoras de genes multiplicados que codifican para una proteína determinada presentan una ventaja selectiva de supervivencia o de crecimiento, podremos detectar el proceso, relativamente raro, de la multiplicación génica. En particular, la presencia de metotrexato en el medio de cultivo proporciona una ventaja selectiva de crecimiento a las células, pocas, que contienen genes de la dihidrofolato reductasa multiplicados; ello nos permite detectar dicha multiplicación.

En nuestra opinión, la multiplicación inicial afecta a un número relativamente pequeño de copias del gen que codifica para la dihidrofolato reductasa. Más tarde estos genes podrán sufrir sucesivas multiplicaciones, lo que facilitará su selección en base a una resistencia al metotrexato aún más elevada. Esta interpretación explica la necesidad de optar por una selección escalonada cuando se pretende alcanzar un nivel elevado de resistencia al fármaco y un gran número de genes

CONCENTRACION DE METOTREXATO →
NUMERO DE CELULAS →
RESISTENCIA AL METOTREXATO →
CANTIDAD EN EXCESO DE DIHIDROFOLATO REDUCTASA →
TIEMPO DE CULTIVO →

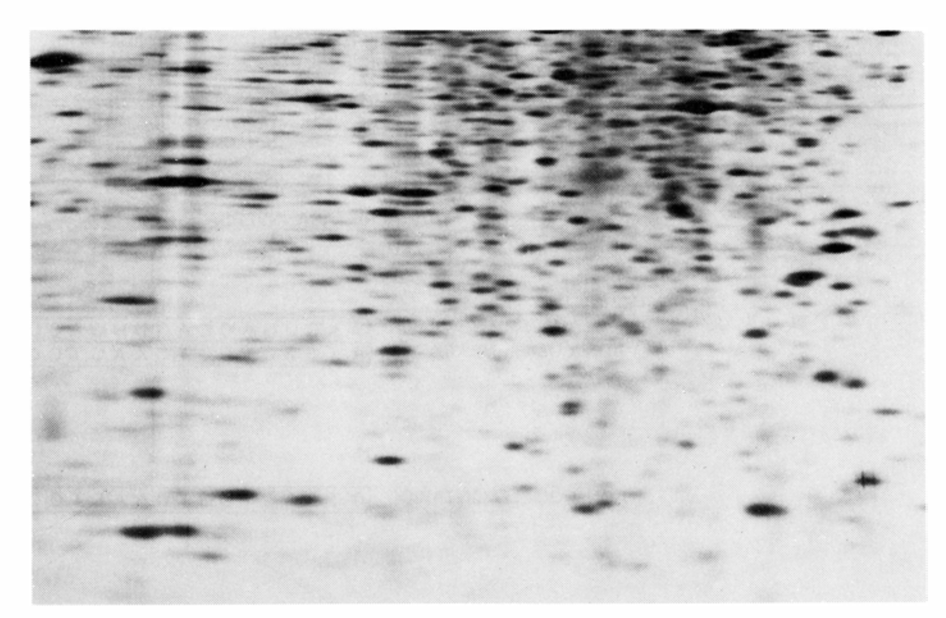
POR SELECCION DIRECCIONAL, o escalonada, se entiende el procedimiento experimental empleado por el autor y sus colegas para incrementar progresivamente la resistencia al metotrexato de los cultivos de células de mamífero, gracias al aumento del nivel de dihidrofolato reductasa en las células. Las células se cultivan inicialmente a una concentración baja de metotrexato, que mata hasta un 99,999 por ciento de las mismas. Sin embargo, algunas células sobreviven y se desarrollan. Son, por definición, resistentes a esa baja concentración de metotrexato. Al analizar la actividad enzimática de estas células, se observa que tienen niveles más elevados de dihidrofolato reductasa. Se permite la multiplicación de estas células hasta que la población es equivalente a la de las células originales y se incrementa entonces bruscamente la concentración de metotrexato en el medio de cultivo, lo que provoca de nuevo la muerte de la mayoría de las células. Las células supervivientes, de nuevo, comienzan a proliferar; poseen un nivel incluso más elevado de enzima y, por tanto, una mayor resistencia al fármaco. Se mantiene el proceso de selección con varios incrementos posteriores de metotrexato en el medio de cultivo (representados aquí por un color progresivamente más oscuro). En cada paso, las células supervivientes poseen niveles más elevados de dihidrofolato reductasa. La resistencia al fármaco deriva en este caso de que existe siempre suficiente enzima en las células como para llevar a cabo la conversión de dihidrofolato en tetrahidrofolato.

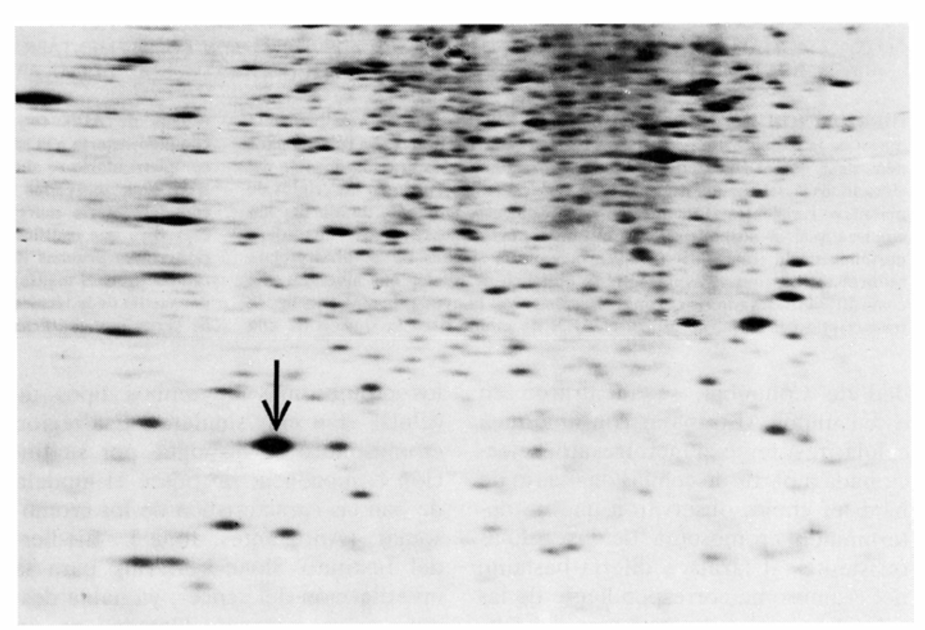
multiplicados. Cualquier intento por llegar a una rápida selección de la secuencia altamente resistente al metotrexato fracasaría a la hora de detectar las células resistentes, por la sencilla razón de que la multiplicación opera a través de muchos pasos iterativos.

El fenómeno de la multiplicación génica en relación con la resistencia a fármacos no se limita al metotrexato. George R. Stark y sus colegas, de la Universidad de Stanford, han estudiado, en cultivos de células de hámster, la adquisición de resistencia a un inhibidor altamente específico de un enzima vital para la síntesis de precursores de los ácidos nucleicos, la aspartiltranscarbamilasa. Siguiendo el método de la selección direccional han obtenido células muy resistentes al fármaco y han demostrado, a través de técnicas similares a las empleadas por nosotros, que el gen que codifica para este enzima se centuplica.

Ambos ejemplos de selección para la resistencia a fármacos coinciden en varios puntos; en primer lugar, se trata de fármacos altamente específicos: inhiben esencialmente a un único enzima, necesario para el desarrollo de las células. En segundo lugar, se obtiene un alto nivel de resistencia al fármaco y un gran número de genes duplicados por medio de la selección direccional o escalonada. En tercer lugar, la resistencia al fármaco se debe al incremento de una proteína determinada que, por encima de un cierto nivel, supera el efecto inhibidor del fármaco. Existen otros ejemplos de selección direccional para resistencia a varios compuestos y fármacos en células de mamíferos que se explican por la presencia de niveles elevados de enzimas específicos, y es probable que, por lo menos en algunos casos, intervenga el proceso de multiplicación génica.

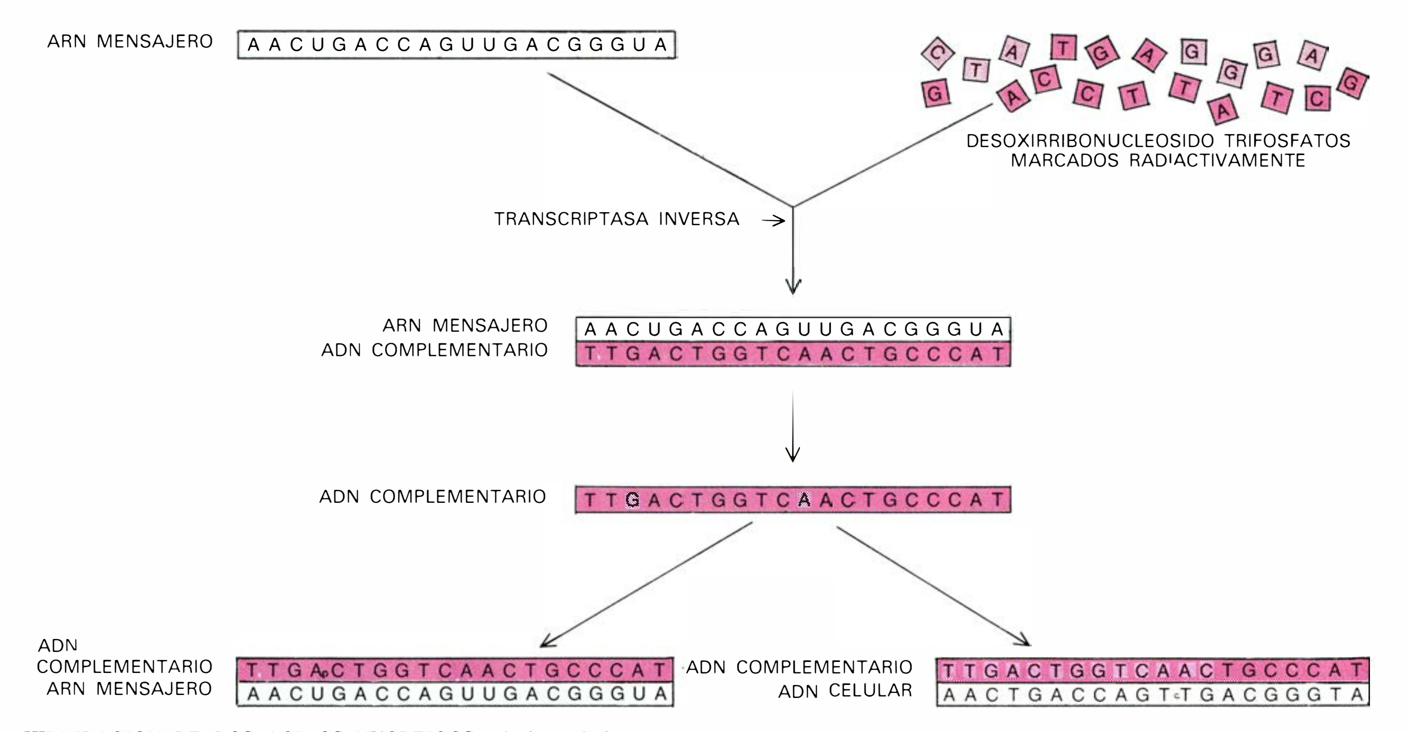
Hubo algo en nuestras primeras observaciones que nos llamó poderosamente la atención: en algunas líneas celulares, la resistencia al metotrexato y el elevado nivel de enzima no eran estables. Cuando tomábamos células cultivadas durante muchos meses en presencia de metotrexato y se desarrollaban luego en un medio que carecía de fármaco, la alta resistencia a la droga y el elevado nivel de enzima disminuían progresivamente. En tan solo 20 generaciones celulares (unos 20 días) algunas líneas perdían hasta la mitad de su contenido en enzima; con el tiempo, las células perdían la mayor parte de su excedente enzimático y la resistencia al metotrexano. Sin embargo, en otras líneas celulares la alta resistencia al fármaco y el alto nivel de enzima se mantenían a pesar de la ausencia de metotrexato en el medio de cultivo. La estabilidad o inestabilidad de una determinada línea celular parece ser independiente del tipo de célula (ratón o hámster) y del valor absoluto del nivel de enzima en exceso alcanzado al final del proceso de selección direccional. De hecho, puede utilizarse la misma fuente de células sensibles al fármaco para obtener tanto líneas celulares estables como inestables. En todos los casos, sin embargo, el número de genes multiplicados tiene que ver con el nivel relativo de enzima. Obviamente, estos genes pueden presentarse en estado estable o inestable.





PARA DISTINGUIR ENTRE PROTEINAS CELULARES se recurre a la técnica de electroforesis bidimensional en gel, que separa las proteínas en una dirección en razón de su tamaño (eje vertical) y en la otra en razón de su carga eléctrica neta (eje horizontal). Al aplicar esta técnica sólo se observa una diferencia importante entre los modelos bidimensionales correspondientes a las proteínas celulares de una muestra de células sensibles al metotrexato (*arriba*) y otra muestra de células resistentes al mismo (*abajo*). La diferencia, indicada por una flecha, estriba en la cantidad de dihidrofolato reductasa de los dos tipos de células. Ambas células proceden de la misma fuente de células de ratón. En primer lugar, las proteínas se marcan con metionina radiactiva y se localiza la radiactividad colocando una película fotográfica sobre el gel y revelando posteriormente la película. Los puntos negros indican la cantidad relativa de cada proteína en las células. Las células resistentes contienen una cantidad mucho mayor de dihidrofolato reductasa que las células sensibles. Micrografías obtenidas por Robert T. Schimke, de Stanford.

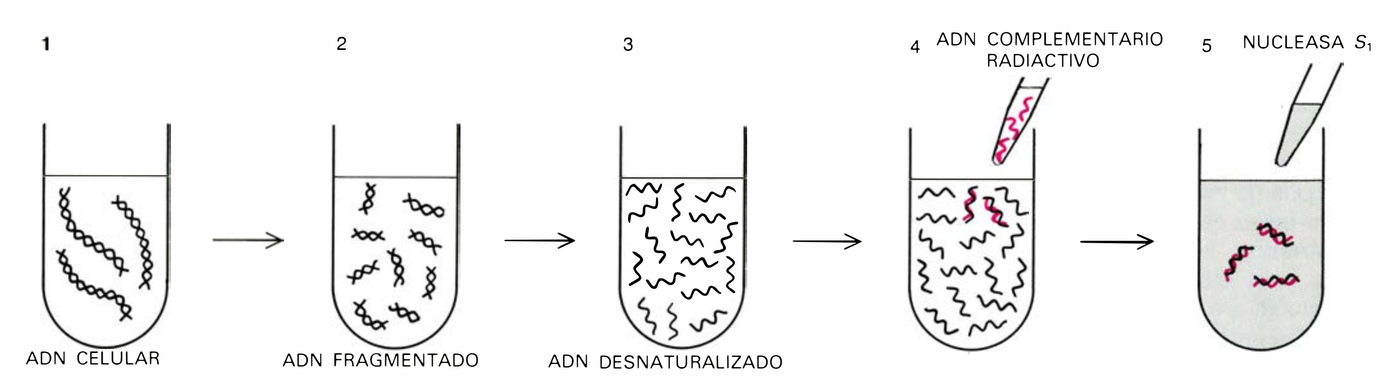
¿Cuál es el mecanismo responsable de esa distinta estabilidad de la resistencia al metotrexato según las líneas celulares? La búsqueda de una respuesta nos aleja de la biología molecular para introducirnos en el estudio de la estructura cromosómica. Dos de nuestros colaboradores, Lawrence A. Chasin y Gail Urlaub, de la Universi-



HIBRIDACION DE LOS ACIDOS NUCLEICOS, técnica relativamente nueva de la biología molecular. Fue utilizada por el autor y sus colegas para demostrar que el fenómeno de la multiplicación génica era responsable del elevado nivel del enzima dihidrofolato reductasa observado en las células de mamífero resistentes al metotrexato. En este caso, la técnica de hibridación empieza por el aislamiento de muestras purificadas de ARN mensajero portador de la información necesaria para la síntesis de la dihidrofolato reductasa. (Las muestras de ARN se obtienen de células que albergan una concentración elevada de enzima.) Después, con la ayuda de otro enzima, la transcriptasa inversa, se utiliza el ARN de molde para la síntesis de una cadena de ADN con una secuencia de bases de desoxirribonucleótidos complementaria a la secuencia de bases de ribonucleótidos del ARN. El ADN complementario se sintetiza a partir de unidades de desoxirribonucleósidos trifosfatos marcados radiactivamente. Puesto que la cadena de ADN complementario marcada radiactivamente contiene la secuencia de bases específica que codifica para la dihidrofolato reductasa, puede utilizarse en posteriores pruebas de hibridación para determinar la cantidad de ADN celular (o ARN mensajero) que codifica para el mismo enzima. En resumen, por medio de la técnica de hibridación se puede determinar el número exacto de genes que codifican para dihidrofolato reductasa en la línea resistente.

dad de Columbia, se adentraron en este campo. Al trabajar con una línea celular resistente al metotrexato, seleccionada a partir de células de ovario de hámster chino, observaron que un determinado cromosoma de las células resistentes al fármaco difería bastante del cromosoma correspondiente de las células sensibles, procedentes del mismo tejido. La diferencia consistía en la presencia de una región dilatada en el brazo largo del cromosoma número 2 de las células resistentes al fármaco (número 2 le viene de ser el segundo cromosoma más largo); por lo demás, los cromosomas de ambos tipos de células eran muy similares. Esa región cromosómica se distingue por su tinción homogénea; no posee el modelo de bandas característico de los cromosomas. (Años antes, June L. Biedler, del Instituto Sloan-Kettering para la investigación del cáncer, ya había descrito estas regiones dilatadas en un determinado cromosoma de varias líneas celulares resistentes al metotrexato procedentes de tejido pulmonar de hámster chino; ¡llegó incluso a sugerir que podía tratarse de regiones de multiplicación génica!)

A partir de las técnicas de hibridación de ácidos nucleicos, descritas anteriormente, determinamos que la línea celular resistente al fármaco estudiada por Chasin y Urlaub poseía unas 150 copias del gen de la dihidrofolato reductasa. La cuestión era: ¿dónde estaban los genes que codificaban para este enzima? Para localizarlos procedimos a hibridar ácido desoxirribonucleico radiactivo, complementario al ARN mensajero para el enzima, con ADN cromosómico procedente de las células resistentes y de las células sensibles al fármaco. Las muestras celulares se



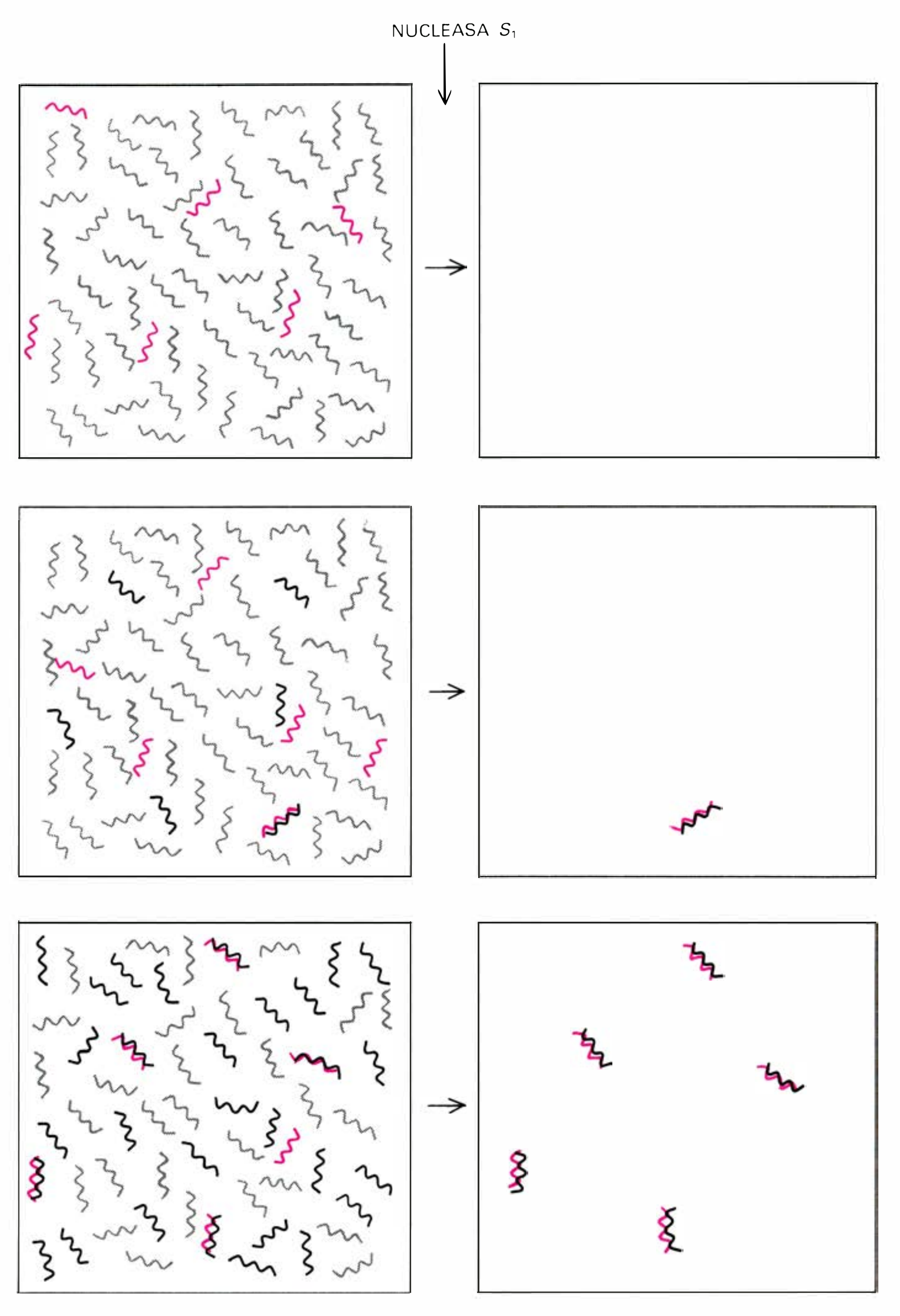
PODEMOS DETECTAR LOS HIBRIDOS con ayuda de otro enzima, la nucleasa S_1; ésta destruye las moléculas monocatenarias de ácido nucleico sin afectar a las de doble cadena, como los híbridos de ADN complementario y ARN o ADN celular. El ADN celular (*1*) se rompe en trozos pequeños (*2*). Luego, los fragmentos de ADN se desnaturalizan (se separan en cadenas sencillas) por calentamiento a 100 grados Celsius (*3*) y se añade a la mezcla una pequeña cantidad de ADN complementario radiactivo (*4*). Cuando el ADN complementario ya ha podido hibridarse con cualquier ARN o ADN de secuencia complementaria, se toman muestras de la mezcla de reacción y se tratan con la nucleasa S_1, que digiere sólo las moléculas monocatenarias (*5*).

trataron de manera que su ADN cromosómico quedara expuesto en primer lugar; con ello se facilitaba la formación de un híbrido con el ADN complementario. (Como este experimento indica, el ADN complementario no sólo puede utilizarse para determinar el número de genes duplicados, sino también para localizar las secuencias génicas en los cromosomas.)

La radiactividad del ADN complementario se detectaba por un método puesto a punto varios años antes por Mary Lou Pardue, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Colocamos una emulsión fotográfica sobre el portaobjetos y observamos al microscopio los granos de plata que aparecían en la emulsión expuesta. Los granos de plata se concentraban siempre en la región del cromosoma número 2 que se teñía homogéneamente; es decir, los genes multiplicados se inscribían en esa región del cromosoma. En un experimento posterior, realizado en colaboración con Joseph R. Bertino, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, demostramos que una línea celular de tejido de ratón con 400 genes multiplicados poseía una región de tinción homogénea comparable en un determinado cromosoma, y que los genes que codificaban para la dihidrofolato reductasa se localizaban en ella. (Sólo uno de los dos cromosomas apareados presentaba esta región dilatada.) A partir de estos y otros estudios hemos llegado a la conclusión de que la multiplicación estable de los genes en cultivos de células de mamíferos está relacionada con la localización de los genes en una región específica de un cromosoma determinado.

¿Dónde se encuentran los genes multiplicados en las líneas celulares inestables? Recientemente hemos descubierto que nuestras líneas celulares inestables contienen, además de la dotación cromosómica normal, pequeños elementos de ADN extracromosómico denominados cromosomas diminutos. Tras purificar estos segmentos extracromosómicos de ADN, se vio que contenían los genes multiplicados para la dihidrofolato reductasa. No se halló ADN extracromosómico de este tipo ni en las células sensibles al metotrexato ni en las resistentes estables (es decir, aquéllas en donde los genes multiplicados son cromosómicos). Descubrimos que el número de estos segmentos de ADN extracromosómico era proporcional al número de genes repetidos. Había casos en los que se contaban 100 elementos de ADN extracromosómico por núcleo. Por otro lado, cuando las células resistentes inestables perdían la resistencia al metotrexato (y, por tanto, los genes multiplicados para la resistencia al fármaco), perdían también los elementos de ADN extracromosómico.

Los segmentos extracromosómicos de ADN que describimos aquí parecen cromosomas: contienen genes y están asociados a ciertas proteínas. Además, al igual que los cromosomas normales, pueden duplicarse en el período de síntesis de ADN. Pero difieren significativamente de los cromosomas normales: carecen de centrómero, estructura cromosómica a la que se une, en la metafase, una fibra de proteína de las que forman el huso acromático. (Se llama metafase al estadio del ciclo celular que sigue a la síntesis de ADN y en el que la dotación cromosómica que acaba de replicarse se distribuye por igual entre las células hijas.) La presencia del huso acromático asegura que los



NUMERO DE GENES que codifican para la dihidrofolato reductasa. Dicha cifra se determina midiendo la tasa de hibridación del ADN complementario para el enzima con el ARN o ADN procedente de células con distintos niveles de enzima. En el ejemplo aquí mostrado se ha añadido una cantidad pequeña, pero constante, de ADN complementario radiactivo (*en color*) a tres mezclas celulares diferentes y se ha calculado la radiactividad de las muestras al cabo de un intervalo de tiempo determinado. En la muestra superior no hay secuencias de nucleótidos celulares complementarios; por tanto, no se detecta hibridación. En la muestra intermedia se aprecia un pequeño número de secuencias complementarias (*en negro*) y la tasa de hibridación observada es baja. En la muestra inferior se recogen muchas secuencias complementarias: la tasa de hibridación es alta. En las líneas resistentes la hibridación era mayor.

cromosomas normales duplicados se segreguen (se distribuyan por igual) en las células hijas durante la mitosis (la división celular). Por carecer de centrómero, los segmentos de ADN extracromosómico no pueden unirse al huso; esto último comporta que los segmentos no se distribuyan necesariamente por igual en la mitosis.

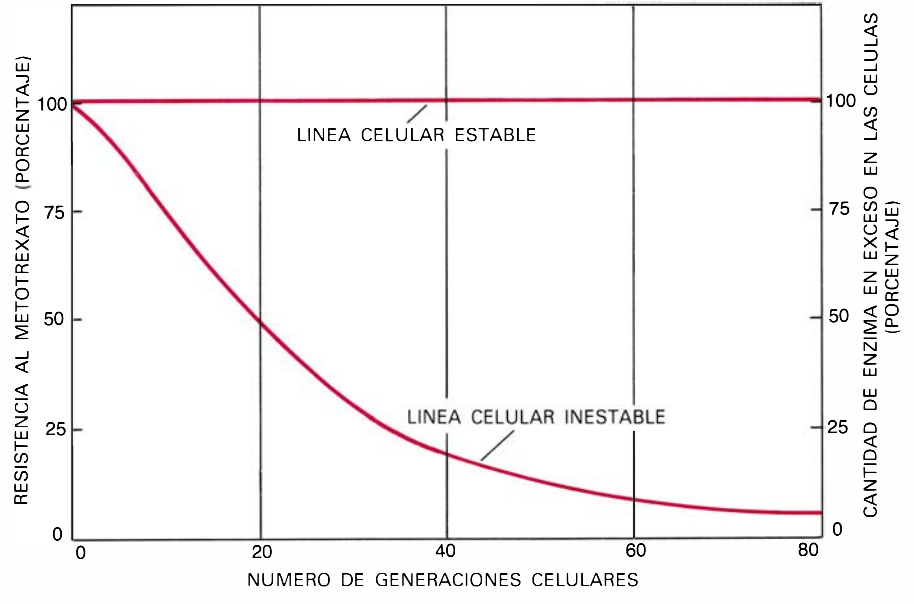
De las características distintivas de estos segmentos extracromosómicos de ADN se deduce que son susceptibles de dos procesos que pueden, en último término, conducir a su desaparición de la célula. Primero, pueden distribuirse de una forma desigual entre las células hijas; en consecuencia, algunas células hijas ganarán genes y otras los perderán. Se sabe que las células que poseen un mayor número de genes para la dihidrofolato reductasa crecen a un ritmo menor que las que poseen menos, cuando ambos tipos de células se cultivan en ausencia de metotrexato. Así, tras un largo período de desarrollo en un medio carente de metotrexato, las células que crezcan algo más deprisa y se dividan a un ritmo mayor (es decir, las células con menos copias del gen para la dihidrofolato reductasa) llegarán a ser dominantes en la población. El resultado neto será que la población celular en su conjunto irá perdiendo gradualmente los genes que codifican para el enzima.

Una segunda consecuencia de que los segmentos de ADN extracromosómico no se enlacen al huso tiene que ver con otro fenómeno, que ocurre durante la replicación de los cromosomas normales en las células. Los cromosomas de todos los organismos superiores están rodeados por una membrana que separa el núcleo del citoplasma. Cuando la célula se divide, el núcleo debe también hacerlo.

En ese momento, la membrana nuclear se disgrega para permitir que los cromosomas se distribuyan entre los núcleos de las dos células hijas. Tras la segregación de los cromosomas, la membrana nuclear ciñe de nuevo a los cromosomas segregados.

Cuando reaparece la membrana nuclear existe la posibilidad de que algunos (o todos) segmentos de ADN extracromosómico queden rodeados por material procedente de la membrana nuclear y formen diminutas entidades conocidas como micronúcleos. Según J. Albert Levan y sus colegas, de la Universidad de Göteborg, estos micronúcleos, desconectados del núcleo donde se encierran los cromosomas, pueden pasar al citoplasma y acabar por abandonar la célula. Por tanto, los genes multiplicados extracromosómicos pueden ser inestables. No sucede así cuando esos genes repetidos se inscriben en cromosomas que sufren el proceso normal de segregación mitótica; al quedar retenidos en las células, son estables.

La posibilidad de que las células hijas no tengan el mismo número de genes que codifican para la dihidrofolato reductasa ni la misma cantidad sobrante de enzima que sus padres (o hermanas) significa que las líneas celulares inestables para la resistencia al fármaco constituirán una población de células con diferentes niveles enzimáticos. ¿Cómo puede determinarse la cantidad de enzima de una célula concreta? Bertino, de la Universidad de Yale, quien trabajó con nosotros en 1978 mientras disfrutaba de un año sabático, sugirió que un derivado del metotrexato, sintetizado por primera vez por John Whieley y sus colegas, de la Scripps Clinic and Research Foundation, podía ser útil para medir el nivel celular de dihidrofolato reductasa. Observamos que este derivado particular del metotrexato, que posee una molécula de fluoresceína, colorante fluorescente, unida a él, se enlaza fuertemente a la dihidrofolato reductasa. Por tanto, la concentración de enzima por célula podría determinarse, en principio, a partir de los niveles de fluoresceína.



ESTABILIDAD DE LA RESISTENCIA AL FARMACO en células de mamífero cultivadas. Resulta muy variable. En este caso, dos líneas celulares diferentes resistentes al metotrexato se cultivaron durante muchos meses en presencia del fármaco. A continuación se trasplantaron a un medio que no contenía el fármaco. Una de las líneas celulares, representada por la curva inferior, perdió rápidamente toda su resistencia al fármaco; también se observó que las células de la línea inestable perdían la mayor parte del enzima dihidrofolato reductasa en exceso. La otra línea celular, representada por la curva superior, mantenía un nivel de resistencia al fármaco elevado y estable y un alto nivel de enzima. La resistencia al fármaco y el nivel de enzima se medían al cabo de varias generaciones celulares como porcentaje de los valores correspondientes a las células control, las cuales continuaban creciendo en presencia de metotrexato. Por término medio, estas células se duplican aproximadamente cada 24 horas. La estabilidad o inestabilidad de una línea celular determinada parece independiente no sólo del tipo de célula sino también del nivel absoluto de enzima alcanzado al comienzo de la prueba. En este caso, ambas líneas celulares resistentes se seleccionaron de la misma fuente de células, de ratón, sensibles al fármaco.

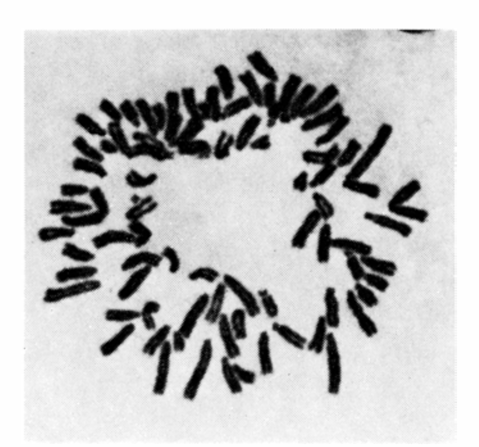
Tuvimos la suerte de poder acceder a un vérsatil instrumento experimental, diseñado por Leonard A. Herzenberg y sus colegas, de Stanford, capaz de clasificar células fluorescentes activadas. A grandes rasgos, el aparato consta de un tubo capilar de vidrio por el que se hace fluir una suspensión de células disociadas y "marcadas" con el colorante fluorescente. Por medio de un láser se dirige un fino haz de luz a través del capilar y se detecta la fluorescencia excitada por el haz en las células individuales. Esta información puede aprovecharse luego para clasificar las células si cargamos eléctricamente las gotas de líquido que contienen las células marcadas, de suerte que, al aplicar un campo eléctrico a favor del flujo, se dirijan las células hacia distintos recipientes. En nuestro ensayo, la fluorescencia de cada célula constituye un indicador directo de la cantidad de dihidrofolato reductasa y, al mismo tiempo, del número de genes presentes. Esta técnica se ha mostrado muy valiosa para el estudio de las variaciones del número de genes multiplicados en poblaciones celulares con resistencias inestables a los fármacos.

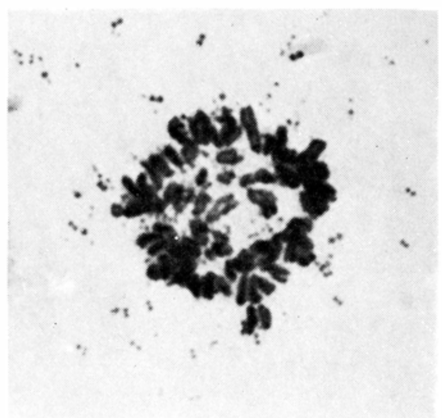
Los experimentos descritos hasta aquí se realizaban con líneas celulares

que habían sufrido múltiples pasos de selección; además, sólo se estudiaban las células después de crecer en presencia de metotrexato durante períodos de tiempo relativamente largos. Con el clasificador de células fluorescentes activadas investigamos poblaciones celulares de ovario de hámster chino en los primeros estadios de multiplicación génica. Al examinar estas células, luego de varios pasos de selección escalonada (es decir, estadios progresivos de multiplicación génica), descubrimos una población extremadamente heterogénea con respecto al número de genes; esta heterogeneidad se deducía de la amplia gradación de fluorescencia de las poblaciones celulares. Observando los núcleos de estas células, hallamos que el número de segmentos de ADN extracromosómico variaba ampliamente de unas a otras. Realizamos también ensayos similares con líneas celulares procedentes de tejidos de ratón.

Parece obvio que si los segmentos de ADN extracromosómico portadores del gen para la dihidrofolato reductasa se generan en estas líneas celulares, y si estos genes pueden distribuirse desigualmente entre las células hijas, la adquisición de niveles progresivamente mayores de resistencia a los fármacos quizá resulte ser un proceso bastante rápido; en efecto, en cada división celular se puede seleccionar la célula hija que posea más genes segregados. Un aspecto curioso (y tal vez importante) de esta fase de nuestro trabajo es el descubrimiento de que la producción de células con resistencia inestable a los fármacos constituye un hecho mucho más frecuente, en los primeros estadios del proceso de selección, que la producción de células con una resistencia estable a los mismos.

¿Qué ocurre con la descendencia de aquellas células que poseen un número elevado e inestable de genes repetidos cuando se cultivan en medios carentes de metotrexato? Podemos separar esas células en cuestión con el clasificador de células fluorescentes activadas; se cultivan luego durante muchas generaciones en un medio donde falta el metotrexato y, por último, se determina la distribución de las células descendientes por razón del número de genes multiplicados que contienen. Observamos que el comportamiento de las diversas descendencias varía bastante. Los descendientes de algunas células pierden todos los genes multiplicados revirtiendo al estado de células sensibles a los fármacos. Otras células producen una descendencia heterogénea, con cantidades variables de enzima por célula. La observación de que las células individuales generan descendientes con diferente número de genes repetidos es una consecuencia predecible del hecho de que los genes que codifican para la dihidrofolato reductasa se hallen en los segmentos de ADN extracromósomico. Dichos genes pueden distribuirse desigualmente entre las células hijas o pueden perderse en su totalidad.





ELEMENTOS DE ADN EXTRACROMOSOMICO, conocidos por cromosomas diminutos. Se trata de los dos puntitos apareados de la microfotografía de la derecha, que muestra la extensión cromosómica típica de una célula resistente al fármaco obtenida a partir de una línea celular inestable en la resistencia al metotrexato; esa línea celular deriva de un sarcoma, o tumor maligno de tejido conectivo, de un ratón. La microfotografía de la izquierda muestra los cromosomas de una célula sensible al fármaco procedente de la misma línea; no se aprecia en ella la existencia de elementos de ADN extracromosómico. Ambas fotografías se tomaron cuando las células se encontraban en la metafase, período de la división celular en que la dotación cromosómica que acaba de duplicarse se distribuye por igual entre las células hijas; los cromosomas se hallan alineados de forma normal antes de que el huso acromático los separe. Sin embargo, los elementos extracromosómicos están esparcidos por todo el campo de visión; no están, pues, alineados de forma que puedan segregarse equitativamente entre las células hijas. En consecuencia, se distribuirán, seguramente, de forma desigual entre las células hijas durante la división celular.

¿Es frecuente el fenómeno de la multiplicación génica en la naturaleza? Hemos pasado revista a la posible importancia de nuestros estudios experimentales en la evolución natural de familias de multigenes y en los procesos de selección al azar observados en bacterias. Se dispone también de pruebas de que la multiplicación génica tiene lugar en los organismos superiores en otras dos situaciones, en las que están implicados los genes que codifican para el ARN ribosómico. Estas moléculas de ARN, a diferencia del ARN mensajero, no participan directamente en la síntesis de proteínas; se unen a ciertas proteínas para formar los ribosomas, que son partículas esenciales del mecanismo celular de la síntesis proteica. En los óvulos de ciertos anfibios existe un estadio de desarrollo, antes de la fecundación, en el que los genes que codifican para los ribosomas proliferan enormemente, multiplicándose hasta por 10.000. Los genes en exceso no están asociados a los cromosomas del óvulo. A lo largo de ese mismo estadio del proceso de desarrollo se registra una síntesis rápida de ribosomas, que se acumulan, inactivos, en la célula y queda aplazada su movilización para la síntesis proteica posterior a la fecundación.

Otro ejemplo de multiplicación génica en la naturaleza es el de los genes que codifican para los ribosomas de *Drosophila melanogaster,* la mosca del vinagre, proceso estudiado detenidamente hace 35 años por A. H. Sturtevant, del Instituto de Tecnología de California. Algunos machos muestran una deficiencia parcial en su capacidad para sintetizar proteínas, probablemente debida a que uno de sus cromosomas contiene muy pocos genes que codifiquen para los ribosomas. Al cruzar estos machos con hembras normales, algunos descendientes son normales; el complemento normal de genes ribosómicos que se observa en estos descendientes resulta, evidentemente, de una multiplicación compensatoria de los genes ribosómicos que proceden de los cromosomas de la hembra normal.

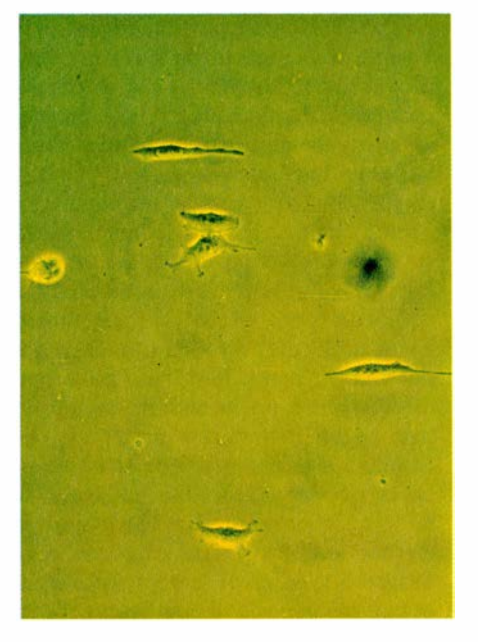
En ambos ejemplos el proceso de multiplicación parece estar condicionado por el requerimiento de un gran número de genes que codifiquen para los ribosomas. En el caso del anfibio la proliferación génica está regulada a nivel de desarrollo y se descubre en todos los óvulos en el momento en que se precisa una síntesis rápida de gran número de ribosomas. En el ejemplo de la mosca del vinagre se requiere igualmente genes ribosómicos adicionales para la síntesis de los ribosomas necesarios en la obtención de descendientes normales. Se conocen varios

ejemplos más, y otros habrán de descubrirse en el futuro.

La multiplicación génica para la resistencia al metotrexato, que hemos descrito en cultivos de células de mamífero, difiere de la multiplicación génica para la síntesis de ribosomas, entre otros aspectos, en que el primer proceso parece ser un hecho relativamente raro que requiere de la selección para ser detectado. No obstante, se han reseñado ya las características de la selección direccional y de la estabilidad variable de la resistencia a fármacos asociada a un elevado nivel enzimático, en ejemplos relacionados con la aparición, en bacterias, de resistencia a los antibióticos y de resistencia a los plaguicidas en insectos. Cabe que la multiplicación sea un proceso más frecuente de lo que se creyera y quizá constituya la base de diversas formas naturales de resistencia a fármacos.

Evidentemente, nuestros descubrimientos suscitan más preguntas que respuestas. Por ejemplo, ¿ocurre la multiplicación génica en las células normales de los animales en su integridad o sólo en los cultivos celulares? ¿Se debe en parte a la multiplicación génica la resistencia al metotrexato y a otros fármacos quimioterapéuticos observada durante el tratamiento del cáncer humano? ¿Existe alguna posibilidad de que ciertos fármacos, tales como el metotrexato, puedan afectar a funciones metabólicas fundamentales, la replicación del ADN, por ejemplo, y de este modo facilitar la multiplicación génica? La respuesta a una gavilla de preguntas conduce, inevitablemente, a la formulación de nuevos interrogantes. Se acaba de detectar regiones teñidas homogéneamente y cromosomas diminutos en líneas de cultivos celulares procedentes de tumores humanos. ¿Por qué aparecen en estas células, que no han sido sometidas a procesos selectivos de resistencia a fármacos? ¿Está ello relacionado con su naturaleza cancerosa?

Los avances de los últimos años en el estudio de la estructura molecular de los genes de organismos superiores han puesto de manifiesto que el potencial de cambio en el ADN y en la estructura cromosómica de las células de mamíferos es mucho mayor de lo que se había creído. Las pruebas provienen no sólo de nuestros estudios sobre multiplicación génica, sino también de otras investigaciones en torno a la recombinación de los segmentos de ADN que codifican para la síntesis de anticuerpos, así como de otras que demuestran la existencia, en organismos superiores, de secuencias transponibles de ADN. Los resultados a que llegaron tales estudios e investigaciones han replanteado el enfoque con que se abordaba el desarrollo normal, la evolución y el mecanismo por medio del cual las células normales se convierten en malignas. Sólo el tiempo y la experimentación nos dirán hacia dónde puede llevarnos esta línea de trabajo.





FLUORESCENCIA de los cultivos de células de mamífero resistentes al fármaco. Puede utilizarse para medir la cantidad de dihidrofolato reductasa que hay en las células. Se incorporan las moléculas de fluoresceína, colorante fluorescente, en las moléculas de metotrexato de suerte que el enlace del fármaco con el enzima no se altere. La microfotografía por contraste de fases de la izquierda muestra una mezcla de células sensibles y resistentes al metotrexato. La microfotografía de la derecha se realizó con un microscopio de fluorescencia especial, después de incubar las células con las moléculas de metotrexato marcadas con fluoresceína. Sólo las células resistentes al fármaco muestran una intensa fluorescencia.

Descubrimiento de una lente gravitatoria

Una pareja de quasars recién descubierta resulta no ser pareja alguna, sino dos imágenes de un quasar único formadas por una lente gravitatoria: una galaxia elíptica a medio camino entre nuestra galaxia y el quasar

Frederic H. Chaffee, Jr.

Se cree que los quasars son los objetos más distantes y luminosos existentes en el universo. Y han puesto a prueba la capacidad de comprensión de los astrónomos desde el mismo momento en que fueron descubiertos. En marzo de 1979 se observaron dos quasars que parecían estar más próximos y presentar más semejanza en sus espectros que ninguna otra pareja de los aproximadamente 1500 quasars conocidos. Ocho meses de trabajo teórico e intensa investigación con los mayores telescopios ópticos y radiotelescopios han demostrado que esos quasars gemelos no eran en manera alguna dos objetos distintos. Antes bien, se trata de un objeto único cuya luz ha sido separada en dos imágenes por el campo gravitatorio de una glaxia situada entre el quasar y nuestra galaxia: una especie de ilusión óptica a escala cósmica. El hecho de que el misterio de los quasars gemelos se haya resuelto en tan poco tiempo constituye un acontecimiento poco menos que insólito en un campo donde muchos problemas requieren años de minucioso análisis para su resolución.

Según la teoría general de la relatividad de Einstein, el campo gravitatorio de un objeto masivo puede desviar un rayo de radiación electromagnética en la dirección del objeto. El fenómeno se ha observado numerosas veces cuando rayos de luz visible y ondas de radio procedentes de objetos distantes pasan cerca del Sol. Los quasars gemelos van más allá de este fenómeno al demostrar que un cuerpo masivo puede actuar de lente gravitatoria, creando múltiples imágenes de un mismo objeto cual si se tratara de una lente óptica.

Los quasars en general han sido un rompecabezas desde que su descubrimiento, hace 20 años, reveló que se están alejando de nosotros a velocidades muy grandes, algunas de las cuales se acercan a la velocidad de la luz. La velocidad de alejamiento de cualquier objeto puede medirse a partir de su espectro. De igual manera que el tono del silbato de un tren varía dependiendo de si se está acercando o alejando de un observador situado junto a la vía (el ejemplo más familiar del efecto Doppler), también varía la longitud de onda aparente de la luz según el movimiento de la fuente luminosa. Por tanto, si una galaxia se está alejando del observador, su luz sufre un "corrimiento hacia el rojo" respecto a él, en una cuantía directamente proporcional a la velocidad de alejamiento.

Se ha hallado que los espectros de la mayoría de las galaxias están corridos hacia el rojo, indicando que las galaxias se están alejando de nosotros. Además, aquellas galaxias cuyas distancias se pueden estimar independientemente tienen corrimientos hacia el rojo proporcionales a sus distancias. Este es el fenómeno que conduce al concepto de universo en expansión. Los astrónomos han dado la vuelta al argumento para sugerir que puede usarse la velocidad de recesión de cualquier objeto para estimar su distancia, aun cuando no sean posibles medidas directas de la distancia. Resulta entonces que los muchos quasars que tienen corrimientos hacia el rojo más grandes que los mayores corrimientos hacia el rojo de cualquier otro objeto conocido en el universo deben ser los objetos más distantes del universo. El que podamos ver los quasars a tales distancias implica a su vez que son también los objetos más brillantes del universo.

Precisamente el brillo de los quasars es lo que ha llevado a algunos astrónomos a poner en duda que los corrimientos hacia el rojo que presentan tales objetos sean simple resultado de un movimiento de alejamiento. Hay fenómenos físicos más sutiles que pueden dar lugar también a un corrimiento hacia el rojo; y si uno de ellos fuera el responsable del corrimiento hacia el rojo observado en los quasars, al menos no existiría el problema de explicar cómo una fuente comparativamente minúscula puede generar 100 veces más radiación que la galaxia más brillante conocida. A pesar de todo, el grueso de los datos existentes sobre quasars apunta hacia la interpretación original del corrimiento hacia el rojo, es decir, que los quasars constituyen los objetos más remotos y luminosos conocidos.

Los 1500 quasars reseñados están distribuidos uniformemente por todo el cielo. Por término medio se encuentra un quasar casi cada 30 grados cuadrados, lo que representa una porción de cielo de aproximadamente el tamaño de la cuenca de la Gran Montaña Rusa. Por consiguiente, constituyó una sorpresa cuando Dennis Walsh, del observatorio radioastronómico de Jodrell Bank, Robert F. Carswell, de la Universidad de Cambridge, y Ray J. Weymann, de la Universidad de Arizona, descubrieron dos quasars separados por sólo seis segundos de arco, distancia angular que equivale a 3,3 milésimas partes del diámetro de la luna llena. Los dos quasars se han designado oficialmente como 0957 + 561 A, B, donde los números dan las coordenadas astronómicas y las letras indican la presencia de dos fuentes en esas coordenadas. En lenguaje coloquial se les conoce por "los gemelos".

La fotografía de los gemelos de tres páginas más adelante, hecha en el decenio de 1950 con el telescopio Schmidt de 1,2 metros del Monte Palomar, muestra dos imágenes parecidas a estrellas de casi igual brillo: unas 20.000 veces más débil que la más débil estrella que puede verse sin telescopio. La proximidad con que ambos objetos

aparecen en el cielo queda indicada por el hecho de que aparecen fundidos en la fotografía constituyendo una imagen ligeramente alargada. Está claro, sin embargo, que la imagen alargada está formada por dos imágenes diferentes más pequeñas.

El 29 de marzo de 1979, Walsh, Carswell y Weymann, trabajando con el telescopio de 2,1 metros del Observatorio de Kitt Peak y el telescopio de 2,3 metros de la Universidad de Arizona, obtuvieron espectros que indicaban que cada una de las dos imágenes lo era de un quasar. Para cada gemelo midieron un corrimiento hacia el rojo de 1,4, lo que significa que los gemelos están alejándose a una velocidad del 70,7 por ciento de la velocidad de la luz; aunque se trata de una velocidad muy alta, en manera alguna es excepcional para un quasar. No fue la velocidad de alejamiento de los gemelos sino los detalles de sus espectros lo que al principio llamó la atención de los investigadores y dejó perpleja después a la totalidad de la comunidad astronómica.

Los espectros de los quasars se caracterizan por anchas líneas emitidas por átomos que han sido despojados de al menos uno de sus electrones por el intenso campo de radiación al que están sometidos. Hay muchas de tales líneas de emisión posibles y cada quasar tiene su conjunto exclusivo de ellas. Lo que cabe destacar a propósito de los



LOS QUASARS GEMELOS 0957 + 561 A, B son dos elipses multicolores inclinadas hacia la derecha y alineadas verticalmente en el centro de esta representación gráfica en falso color producida por ordenador que delimita la radioemisión de la región. Los colores negro, verde, rojo, amarillo, azul oscuro, azul claro, púrpura y blanco corresponden, respectivamente, a zonas de intensidad de radioemisión creciente con una longitud de onda de seis centímetros. Los adversarios de la explicación de la lente gravitatoria como origen de los gemelos se sintieron preocupados por la ausencia de imagen de la galaxia desviadora entre los gemelos y por la ausencia en la vecindad del gemelo meridional (*abajo*) de una imagen de las manchas multicolores de emisión a la izquierda del gemelo septentrional (*arriba*). Los datos para esta representación fueron recogidos por el instrumento Gran Distribución del Observatorio Nacional de Radioastronomía. La observación fue realizada por Perry E. Greenfield y Bernard F. Burke, del MIT, y David H. Roberts.



LA GRAN DISTRIBUCION (VLA) que produjo la representación de la página anterior es una colección de 27 antenas parabólicas en forma de *Y* cerca de Socorro. Cada parábola mide 25 metros de diámetro.



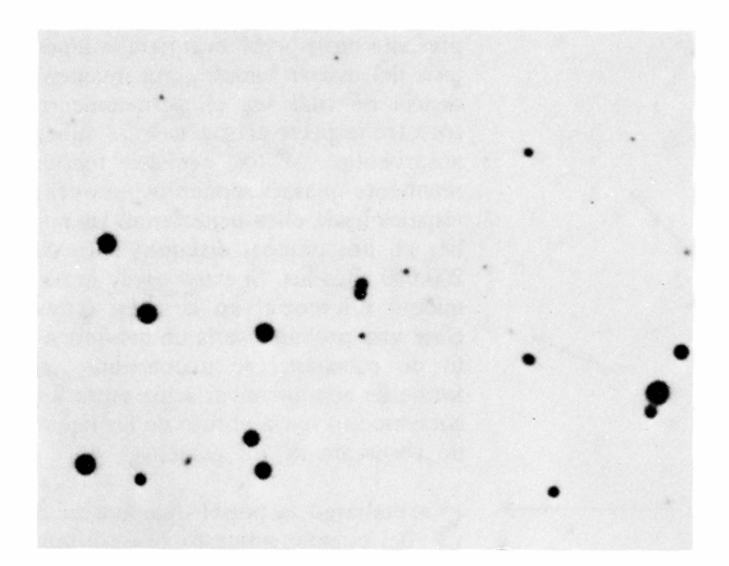
TELESCOPIO DE ESPEJO MULTIPLE (MMT), del Monte Hopkins en Arizona. Se usó para medir el corrimiento hacia el rojo de los gemelos. Cada uno de los seis espejos tiene 1,8 metros de diámetro.

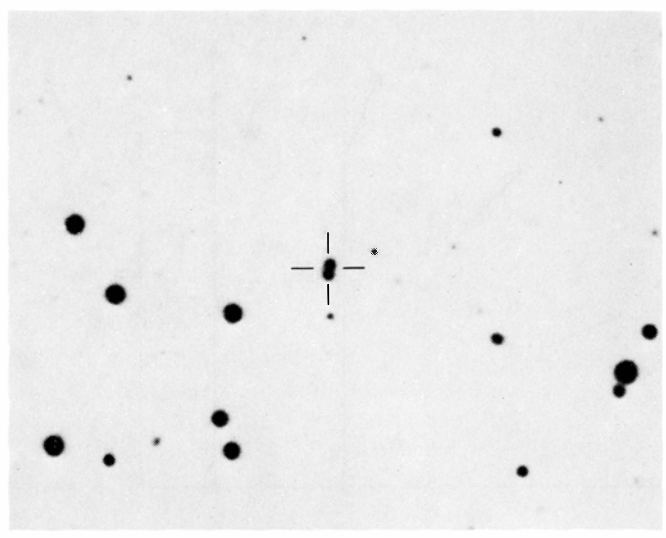
gemelos es la semejanza de sus espectros. Además de ofrecer el mismo conjunto de líneas de emisión, la intensidad de cada línea particular en un espectro es igual que la de la misma línea en el otro. Los descubridores hallaron también que todas las líneas presentaban el mismo corrimiento hacia el rojo dentro del margen de error de sus medidas.

Como muchos otros quasars, los gemelos tienen en sus espectros marcadas líneas de absorción que probablemente se originan en el gas frío interpuesto entre el quasar y nuestra galaxia. El corrimiento hacia el rojo de esas líneas de absorción suele diferir del de las anchas líneas de emisión, y en algunos quasars las líneas de absorción muestran más de un corrimiento hacia el rojo, lo que revela que la radiación ha pasado a través del correspondiente número de nubes.

Walsh, Carswell y Weymann observaron que las líneas de absorción en el espectro del quasar A tenían todas el mismo corrimiento hacia el rojo; ello equivalía a decir que la radiación pasaba a través de sólo una nube interpuesta. El corrimiento hacia el rojo de las líneas de absorción (70,1 por ciento de la velocidad de la luz) es próximo al corrimiento hacia el rojo de las líneas de emisión (70,7 por ciento), lo que sugiere que la nube interpuesta está próxima al quasar mismo. Además, las líneas de absorción en el espectro del quasar B tienen el mismo corrimiento hacia el rojo que las líneas de absorción en el espectro del quasar A dentro de una incertidumbre experimental de 150 kilómetros por segundo. La nube se está alejando de nosotros a la velocidad de 210.000 kilómetros por segundo, de modo que una diferencia de 150 kilómetros por segundo es realmente muy pequeña. La situación es análoga a la de dos automóviles que circularan juntos por una autopista, uno a 70 kilómetros por hora y el otro a 70,06. Para un observador situado al borde de la autopista, las velocidades de ambos automóviles serían indiscernibles. No es exagerado, pues, afirmar que los gemelos se parecen, en las características de sus líneas de emisión y en las de absorción, más que lo que pueda semejarse cualquier otro par de quasars que podamos escoger; y es esa sorprendente semejanza la que requiere explicación.

Es bien sabido que existen estrellas binarias que orbitan una alrededor de la otra. ¿Podrían ser los gemelos simplemente el primer ejemplo conocido de quasar binario? No cabe duda de que están físicamente relacionados; de





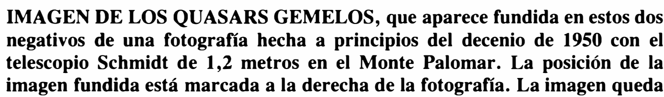


IMAGEN DE LOS QUASARS GEMELOS, que aparece fundida en estos dos negativos de una fotografía hecha a principios del decenio de 1950 con el telescopio Schmidt de 1,2 metros en el Monte Palomar. La posición de la imagen fundida está marcada a la derecha de la fotografía. La imagen queda fundida a causa del movimiento de la atmósfera terrestre; si el telescopio hubiese estado por encima de la atmósfera, podría haber resuelto objetos 60 veces más próximos que los gemelos. La fotografía pone de relieve la dificultad de examinar el espacio entre los gemelos con instrumentos ópticos.

tratarse de un quasar binario, las semejanzas en sus espectros obedecerían al hecho de haber surgido y evolucionado en el mismo entorno cósmico. ¿Qué explicación adicional puede hacer falta?

Esa pregunta marcó la línea divisoria entre dos bandos en que se agrupó la comunidad astronómica acerca de la interpretación de los gemelos; debe considerarse, pues, con todo cuidado. Las indicaciones en contra de la hipótesis del quasar binario se fundan, sobre todo, en la interpretación de las líneas de absorción, particularmente en la semejanza de los corrimientos de éstas hacia el rojo.

La naturaleza de las nubes responsables de las líneas de absorción en los espectros de los quasars sigue siendo objeto de debate en la comunidad astronómica, cuyas opiniones se dividen entre tres hipótesis. La primera atribuye la nube a materia que fue expulsada del quasar en una violenta explosión. La segunda supone que la nube es una entre muchas aglomeraciones de materia primitiva esparcidas en el espacio por la gran explosión. La tercera sugiere que la nube es un "halo" de gas que rodea a una galaxia ordinaria que forma parte de un cúmulo de galaxias y puede incluir al quasar o estar situada en la visual entre el quasar y nuestra galaxia. Las tres hipótesis tienen consecuencias que van mucho más allá de la interpretación de los gemelos, pero me limitaré a las que guardan relación con ellos.

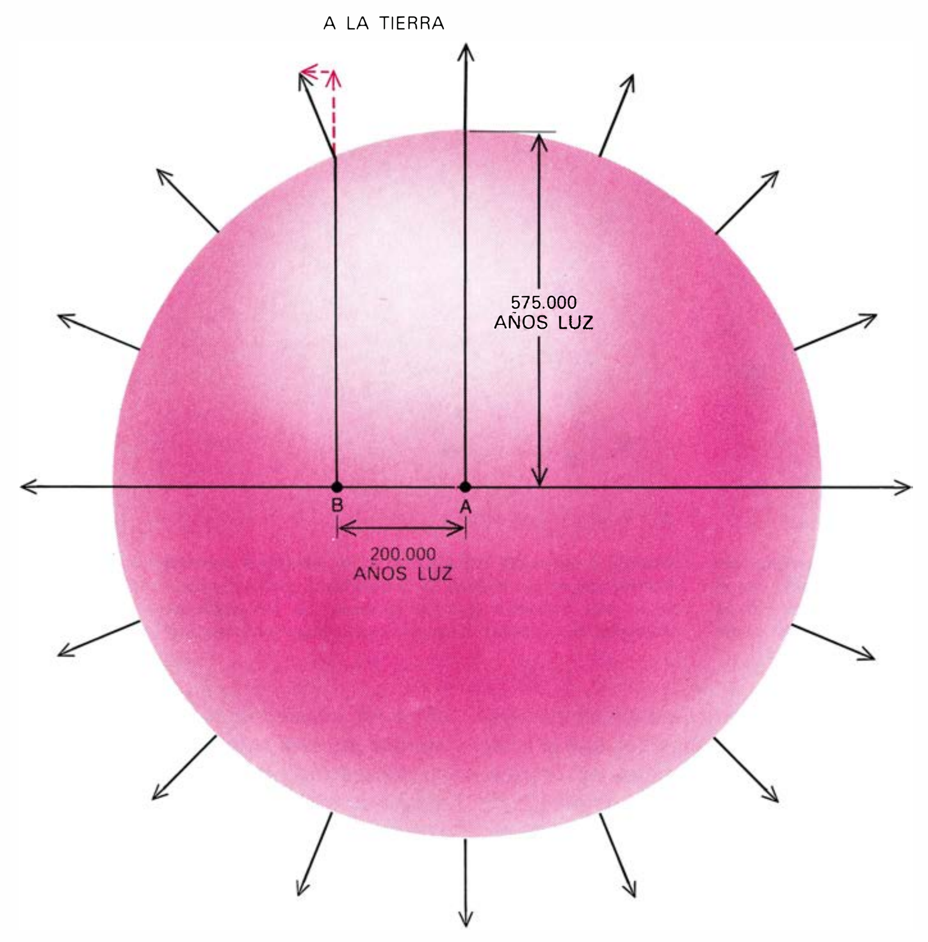
Sólo es preciso examinar en detalle la primera de las hipótesis, porque uno de sus puntos débiles en la explicación de lo gemelos lo es también en las otras dos hipótesis. Supongamos que la nube que rodea a los gemelos se hubiese originado en una violenta expulsión de materia en uno de ellos, por ejemplo en el quasar A, en algún instante del pasado. (El análisis sería el mismo si la materia hubiera sido expulsada por el quasar B.) La ilustración de la parte superior de la página siguiente muestra la relación geométrica actual entre los quasars y la nube, que parece como un estrato esférico en expansión con una velocidad v. La componente de v hacia nosotros donde la visual desde la Tierra al quasar A corta al estrato es igual a la diferencia entre la velocidad representada por el corrimiento hacia el rojo de las líneas de emisión en el quasar A (es decir, la velocidad del quasar respecto a nuestra galaxia) y la velocidad representada por el corrimiento de las líneas de absorción del quasar A (es decir, la velocidad de la nube respecto a nuestra galaxia). Análogamente, la componente de la velocidad de expansión de la nube hacia la Tierra donde la visual al quasar B corte a la nube es la diferencia entre la velocidad representada por las líneas de emisión del quasar B y la representada por las líneas de absorción del quasar B.

El cálculo de la velocidad a partir de una medida del corrimiento hacia el rojo sólo da la componente de la velocidad del objeto según la visual. Esto significa que en la ilustración de la parte superior de la página siguiente, la velocidad de la nube medida hacia el quasar A es igual a la velocidad de expansión de la nube v; la velocidad de la nube medida hacia el quasar B sería algo inferior a v. A partir de la distancia a los quasars deducida de su corrimiento hacia el rojo, podemos calcular su separación, que resulta de 200.000 años-luz, casi tres veces el diámetro de una galaxia típica. Con ese valor y la diferencia entre los corrimientos hacia el rojo de las líneas de absorción hacia A y B (que las observaciones originales mostraron no podía exceder de 150 kilómetros por segundo), se puede calcular que el radio de la nube ha de ser de 575.000 años-luz.

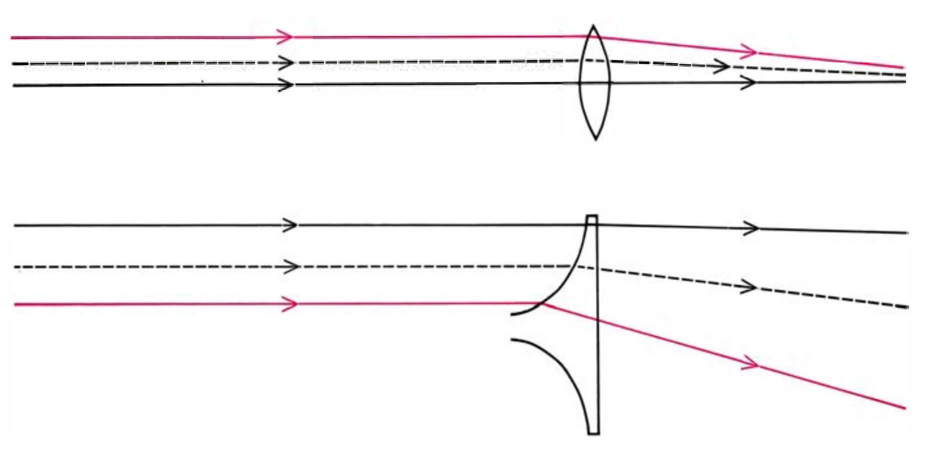
Combinada con la intensidad medida de las líneas de absorción, esta distancia permite calcular que la masa mínima de la nube es de 10^{12} veces la masa del Sol, o 10 veces la masa de la totalidad de nuestra galaxia. La energía requerida para expulsar una capa de tal masa a la velocidad medida es increíblemente grande: 10^{61} erg, o sea, la energía de 10^{28} soles expelidos en una violenta explosión. Esta absurda cifra hace inmediatamente dudar de la verosimilitud de la hipótesis de que los gemelos sean quasars separados.

Sin embargo, los partidarios de la hipótesis del quasar binario argumentan que los valores absurdos de la energía y la masa de la nube valen sólo si la nube es una capa completamente esférica. Supongamos que uno de los quasars hubiera expulsado un pequeño chorro de materia hacia nuestra galaxia. Después se expandiría para formar una nubecilla a través de la cual se verían los quasars. En ese caso, sólo se habría puesto en juego una cantidad comparativamente pequeña de materia y la energía de expulsión sería mucho menor que 10^{61} erg.

La semejanza de las velocidades de las líneas de absorción, sin embargo,



HIPOTESIS DEL QUASAR BINARIO: propugna que los gemelos no son imágenes dobles de un quasar único sino dos quasars reales. Pero ponemos en aprieto dicha interpretación si consideramos las relaciones geométricas entre los dos quasars hipotéticos y una capa de gas en expansión, eyectada con velocidad *V* por uno de ellos en alguna época del pasado. (La capa de gas en expansión se precisa para explicar la similaridad de las líneas de absorción en los espectros.) Las relaciones geométricas conducen a valores imposibles para la masa de la capa y la energía necesaria para su expulsión.



MODELO OPTICO DE UNA LENTE producida por una masa puntual, desarrollado en estos dos diagramas. El gráfico superior representa una lente convergente ordinaria, en la que la desviación de la luz es tanto menor cuanto más cerca pasa del centro. En una lente gravitatoria de masa puntual, la luz se comporta al revés: cuanto más cerca pasa del centro, tanto mayor será su desviación. En el gráfico inferior se describe una analogía óptica de una lente gravitatoria. La lente tiene la forma del pie de una copa de licor. (Para ser estrictamente análogo a una masa puntual desviadora, el pie debería extenderse hasta el infinito y hacerse crecientemente delgado.) Podemos tomar una copa real de licor para poner de manifiesto las propiedades de formación de imágenes de una lente gravitatoria. Si se dibuja un punto en una hoja de papel y se mira con un ojo a través de la base de una copa sostenida a algunos centímetros por encima del papel, el punto es invisible, y su imagen está a cierta distancia de la posición real del punto. Cuando el punto, la lente y el ojo están los tres precisamente en línea recta, la imagen del punto es un anillo. De manera semejante, si un quasar, una masa desviadora y la Tierra estuvieran en perfecta alineación, la imagen del quasar vista desde la Tierra sería un anillo brillante. Si la copa se desplazara hacia la derecha o hacia la izquierda, el anillo se rompería en dos imágenes en forma de ranura. Una alineación imperfecta del quasar, la lente y la Tierra produciría imágenes gemelas del quasar.

presenta otros problemas para la hipótesis del quasar binario, con independencia de cuál sea el planteamiento correcto respecto al origen de las nubes absorbentes. Si los gemelos fuesen realmente quasars separados, nuestras visuales hacia ellos penetrarían las nubes en dos puntos, distantes entre sí 200.000 años-luz. Si existe algún movimiento diferencial en la nube (cuya clase más probable sería un movimiento de rotación), se manifestaría en forma de una ligera variación entre los corrimientos hacia el rojo de las líneas de absorción de los gemelos.

Sin embargo, es posible que una nube del tamaño supuesto girase a una velocidad razonable y mostrase, no obstante, una diferencia de velocidad de menos de 150 kilómetros por segundo entre dos puntos separados por 200.000 años-luz. Pero si, al mejorar las medidas, se descubriese que la diferencia de velocidad es menor, aumentarían las dificultades para interpretar los gemelos en términos de quasars separados. Por esta razón, el paso siguiente en el estudio de los gemelos fue tratar de mejorar la calidad de los espectros y medir con mayor exactitud las velocidades reveladas por las líneas de absorción.

Lo que he descrito arriba corresponde a la situación existente tres semanas después de haberse descubierto los gemelos. Entonces Walsh, Carswell y Weymann se asociaron con Marc Davis, del Harvard College Observatory, Nathaniel P. Carleton, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, y conmigo, para tratar de aumentar la precisión de las mediciones del corrimiento hacia el rojo. Por tratarse de objetos de suma debilidad, la realización de mediciones más precisas requería telescopios mayores y tiempos de exposición más largos. Afortunadamente, el nuevo telescopio de espejo múltiple (MMT, del inglés “multiple-mirror telescope”) del Observatorio Astrofísico Smithsoniano y de la Universidad de Arizona acababa de entrar en servicio. El instrumento combina los rayos de luz recogidos por seis telescopios de 1,8 metros reunidos en una estructura única, de modo que el conjunto es equivalente a un telescopio de un solo espejo cuyo diámetro mida 4,5 metros.

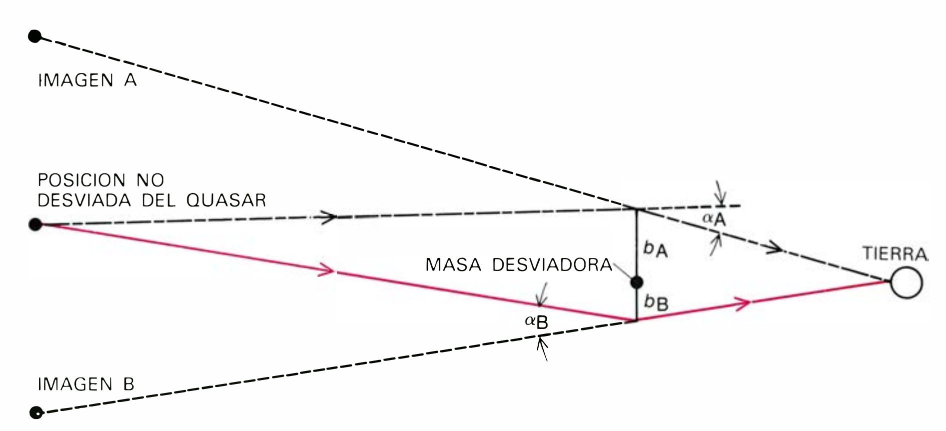
En las noches del 20, 21 y 22 de abril de 1979, montamos un espectrógrafo en el plano focal del MMT y apuntamos el telescopio hacia los gemelos. Aunque el MMT no se había usado nunca con un espectrógrafo anteriormente, los resultados fueron excelentes. Los espectros medidos eran de tan

alta calidad que pudimos con plena confianza llegar a la conclusión de que las velocidades de los quasars deducidas de las líneas de absorción no diferían en más de 15 kilómetros por segundo. Esto multiplicaba por diez la semejanza detectada entre los gemelos según las medidas originales de Kitt Peak. Tan extremadamente pequeña diferencia de velocidad elimina la posibilidad de que las líneas de absorción semejantes se originasen en el interior de toda una capa eyectada por un quasar. El radio, la masa y la energía de formación de la capa, que ya habían forzado los límites de la credibilidad, serían ahora todavía mayores.

Aun cuando la materia expulsada fuera sólo una nubecilla en expansión hacia la Tierra, la pequeña diferencia de velocidades medida por el MMT es inferior a lo que cabría esperar si la nubecilla estuviera en rotación. Por supuesto, es concebible que estemos viendo la nubecilla con su plano de rotación perpendicular a la visual hacia los gemelos. En este caso, la nubecilla no mostraría movimiento hacia el observador o alejándose de él, de modo que el corrimento hacia el rojo no quedaría afectado. La diferencia real de velocidad sería entonces siempre menor que la diferencia media, con independencia de la precisión de las medidas espectrales.

Esta explicación requiere dos circunstancias excepcionales. En primer lugar, la nubecilla tiene que ser eyectada hacia el observador y no en cualquier otra dirección. En segundo lugar, la naturaleza tendría que haber conspirado para orientar la rotación de la nubecilla de tal suerte que no pueda detectarse. Aunque no es imposible que la nubecilla pudiera tener esta orientación, a muchos investigadores esta explicación les dio la impresión de pecar por demasiado artificiosa. Por cuya razón, Walsh, Carswell y Weymann propusieron entonces un planteamiento radical: para ellos, los gemelos eran imágenes de un objeto único vistas a través de una lente gravitatoria.

El hecho de que un objeto masivo pueda curvar un rayo de luz que pase cerca de él (o, con mayor rigor, que el espacio alrededor del objeto masivo se deforme por la presencia del objeto) se deduce directamente de la teoría general de la relatividad, que trata de la interacción entre espacio, tiempo y gravitación. De hecho, una de las comprobaciones clásicas de la teoría general de la relatividad –la cuantía, correctamente predicha, del cambio observado en la posición aparente de las estrellas distantes vistas cerca del borde del Sol durante un eclipse total de éste– es una manifestación del mismo fenómeno, que, bajo diferentes condiciones, puede separar las imágenes de objetos distantes.



DIBUJO, MUY ESQUEMATIZADO, DE UNA MASA PUNTUAL que actuara de lente gravitatoria. Los rayos de luz (u ondas de radio) procedentes de un quasar que pasan a cierta distancia a un lado u otro de un deflector de gran masa se curvarán hacia el observador. Sus trayectorias verdaderas se representan como líneas continuas. El observador no ve que los rayos se doblen, si no que los percibe como si llegaran hasta él en línea recta. Resultado de ello, ve dos imágenes del quasar separadas de la posición verdadera de éste. El ángulo α de desviación del rayo vale $4GM/c^2b$, donde G es la constante de gravitación universal, M es la masa desviadora, c la velocidad de la luz y b es la distancia entre rayo y masa.

Ya en 1937, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, había sugerido que muchas galaxias (o "nebulosas", como muchos astrónomos las llamaban entonces) que se hallaran a diferentes distancias podrían aparecer superpuestas en el cielo. Zwicky concluía: "Es de esperar que el campo gravitatorio de cierto número de nebulosas en primer plano desvíe la luz que viene hacia nosotros procedente de ciertas nebulosas situadas al fondo. La observación de tales efectos de lente gravitatoria promete suministrarnos la determinación más sencilla y exacta de las masas nebulares."

Einstein reconoció la posibilidad de que la imagen de una estrella distante se separase en dos por el campo gravitatorio de otra interpuesta, pero en 1937 concluía en un artículo que "no había gran probabilidad de observar tal fenómeno". A resultas de este desalentador comentario, el asunto de las lentes gravitatorias permaneció casi sin explorar hasta el descubrimiento de los quasars, un cuarto de siglo más tarde. Se encontraban aquí objetos lo bastante brillantes para ser vistos a distancias lo suficientemente grandes como para que su luz, en su camino hacia el sistema solar, tuviera probabilidad de pasar cerca de algún objeto masivo que la desviase según las predicciones de la relatividad general. Una estrella única carecería de masa suficiente para producir una separación mensurable, pero sí una galaxia entera o un agujero negro.

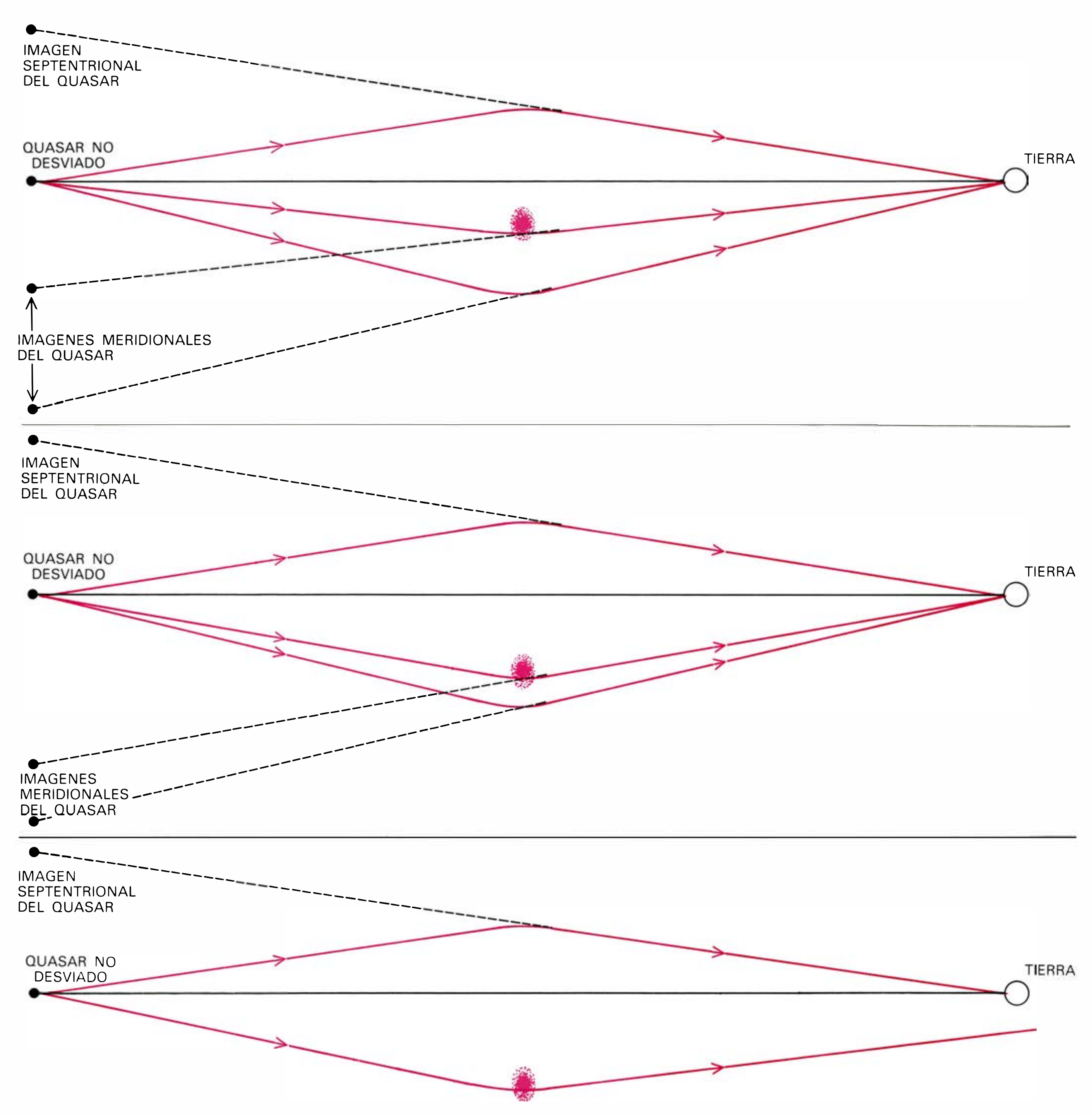
El objeto desviador se llama lente gravitatoria porque, bajo ciertas condiciones, dirige hacia el sistema solar más luz procedente de una fuente distante que la que le llegaría en ausencia del objeto. Por consiguiente, el objeto puede hacer converger la luz de la misma manera que lo hace una lente. Incluso se ha llegado a proponer la teoría de que las lentes gravitatorias podrían explicar el rompecabezas fundamental de todos los quasars: su enorme producción de energía. Si los quasars son simplemente imágenes de objetos más familiares, su brillo aparente podría explicarse por la existencia de una lente gravitatoria interpuesta. Tal interpretación, sin embargo, se encuentra en seguida con graves dificultades. Hay sólo una remota probabilidad de encontrar cada uno de los 1500 quasars adecuadamente alineado con objetos masivos interpuestos. Aun cuando los quasars estuvieran así alineados, las galaxias que sirven de lentes deflectoras deberían verse en las fotografías de todos los quasars próximos. El salto especulativo final será argumentar que las lentes no aparecen en las fotografías porque no son galaxias, sino agujeros negros.

A causa de su naturaleza especulativa, el tema de las lentes gravitatorias parecía exhalar, para la notoriamente conservadora comunidad astronómica, cierto tufo a brujería. Como resultado, Walsh, Carswell y Weymann tuvieron extremo cuidado en examinar todas las explicaciones clásicas posibles de los gemelos antes de volver a la hipótesis de la lente gravitatoria. A nadie le hace gracia perder su crédito si se demuestra que estaba equivocado.

¿De qué manera separa una lente gravitatoria de masa M la luz de un

quasar? Supongamos que la luz pasa a la distancia b a ambos lados de un deflector puntual, como muestra la ilustración de la página precedente. En ese caso, el ángulo α de desviación de la luz viene dado por la fórmula de Einstein $\alpha = 4GM/c^2b$, donde G es la constante de gravitación universal y c designa la velocidad de la luz. Consiguientemente, cuanto mayor sea la masa de la lente y cuanto más cerca de ella pase la luz, tanto mayor será el ángulo de desviación. Hay un rayo de luz a un lado de la lente y otro al otro lado, que serán desviados directamente hacia el observador. El observador no ve la curvatura de la luz, y a él le parece que ésta se ha propagado en línea recta, no desde la posición real del quasar, sino desde otros dos puntos en el cielo. La alineación del quasar, la lente y el observador es decisiva para que resulten dos imágenes. Si éstas han de mostrar el mismo brillo, la lente estará a medio camino entre ellas.

La vía directa para comprobar la hipótesis de la lente gravitatoria consiste en fotografiar el área del cielo entre los quasars y ver si en él se puede detectar una débil galaxia. Se trata de una comprobación difícil, habida cuenta de cuán arduo resulta distinguir dos imágenes de quasars en la fotografía de la página 35, hecha con el telescopio de Monte Palomar, incluso sin tener que buscar ningún objeto débil entre ellas. Las imágenes se ven borrosas, debido principalmente al movimiento de la atmósfera terrestre por encima del telescopio. Si hubiera una débil galaxia entre los gemelos, podría fotografiarse sólo en una noche de excepcional

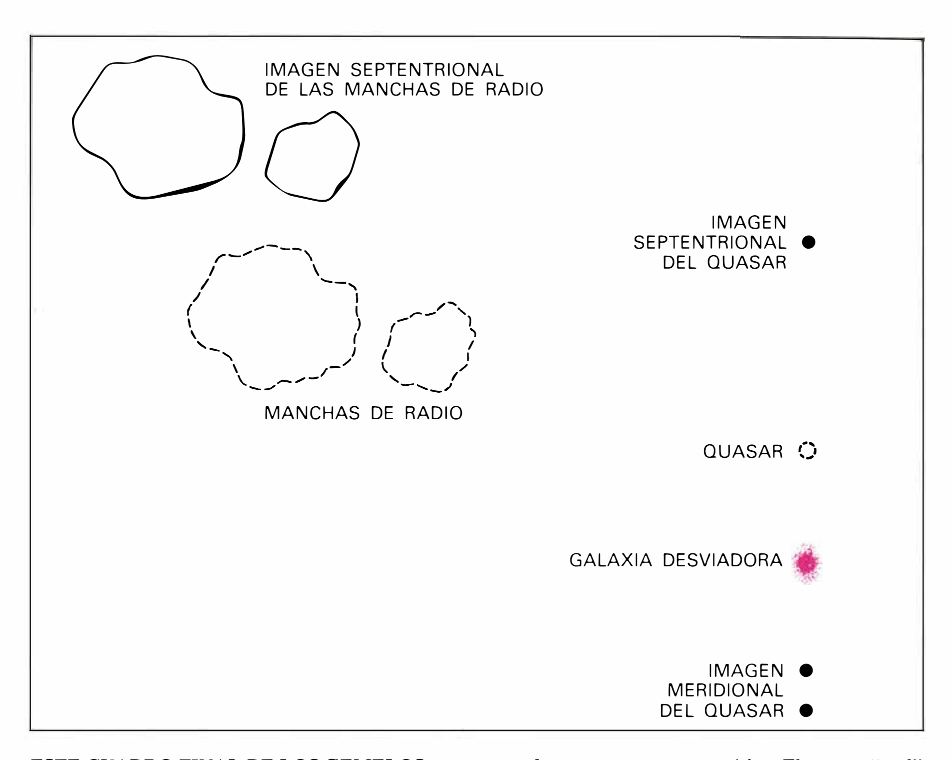


SE REPRESENTA AQUI UNA MASA EXTENSA, una galaxia elíptica por ejemplo, actuando como lente gravitatoria en tres situaciones de creciente falta de alineación entre el quasar, la masa y la Tierra. A diferencia de la masa puntual, una masa extensa puede crear tres imágenes al comportarse como lente gravitatoria. Cuando la alineación es casi perfecta (*arriba*), se crean tres imágenes. A medida que la galaxia se separa de la recta que une el quasar y la Tierra (*centro*), dos de las imágenes se debilitan y se aproximan entre sí. Al separarse más la galaxia (*abajo*), desaparecen dos imágenes.

visibilidad. El día 15 de junio de 1979, Mark T. Adams y Todd A. Boroson, de la Universidad de Arizona, fotografiaron los gemelos con el telescopio de cuatro metros de Kitt Peak, pero los resultados no fueron concluyentes. Después de este intento, los astrónomos ópticos tuvieron que suspender sus propósitos porque los gemelos se habían acercado demasiado al Sol y no volverían a dejarse ver en el cielo nocturno hasta noviembre.

Sin embargo, los radioastrónomos que estaban estudiando los gemelos sí pudieron continuar su trabajo porque las radioondas del Sol no son suficientemente intensas para interferir con tales observaciones, y la atmósfera terrestre no dispersa de un modo apreciable las radioondas como hace con la luz visible. Las radio-observaciones, que continuaron a lo largo de todo el verano, revestían particular interés porque la desviación de la radiación electromagnética por la gravedad no depende de la longitud de onda; por tanto, si la hipótesis de la lente gravitatoria fuese correcta, los gemelos tendrían que aparecer dobles, no sólo a longitudes de onda ópticas, sino también en la banda de radio. Una radiofotografía de los gemelos podría revelar también la presencia de un objeto masivo interpuesto, capaz de actuar como lente gravitatoria.

El poder de un telescopio para resolver objetos que aparecen muy próximos entre sí es directamente proporcional a su diámetro e inversamente proporcional a la longitud de onda a la cual funciona. Si no hubiera sido por la turbiedad de la atmósfea, el telescopio Schmidt de 1,2 metros con el cual se tomó la fotografía de los gemelos de la página 35 podría haber resuelto dos objetos que se encontrasen muy cercanos a 0,1 segundo de arco; es decir, 60 veces más próximos de lo que los gemelos parecen estar. En las longitudes de onda de radio, el efecto de la turbiedad es despreciable, de modo que los radiotelescopios funcionan con la resolución predicha por la teoría. Sin embargo, las longitudes de onda de radio son típicamente 100.000 veces mayores que las longitudes de onda ópticas, de modo que un radiotelescopio del tamaño del telescopio óptico Schmidt de 1,2 metros difícilmente sería capaz de resolver dos objetos separados por 10.000 segundos de arco. De hecho, un radiotelescopio de ese tamaño fundiría entre sí dos objetos situados en los extremos del diámetro del paraboloide de la Montaña Rusa.



ESTE CUADRO FINAL DE LOS GEMELOS se presenta de manera muy esquemática. El quasar "real" (*circunferencia de trazos*) es una fuente óptica puntual con dos extensas manchas de radioemisión (*también de trazos*) a un lado. Aproximadamente a mitad de camino entre el quasar y nuestra galaxia hay una galaxia elíptica separada unos tres segundos de arco de la línea que une el quasar verdadero y la Tierra. La galaxia elíptica forma tres imágenes del quasar distante, una desviada hacia arriba de la posición "real" del quasar y dos desviadas hacia abajo de ésta, cayendo casi una encima de la otra. La recta que une cualquiera de las radiomanchas con la Tierra pasa lo suficientemente lejos de la galaxia para que se forme una sola imagen de cada una de ellas; esta imagen única está separada hacia arriba y a la izquierda de su posición real. Por consiguiente, ninguno de los objetos cuyo contorno está dibujado a trazos se "ve" en las fotografías del cielo, sino que únicamente aparecerán las imágenes cuyo contorno es continuo.

A lo largo de los últimos siete años, el Observatorio Nacional de Radioastronomía ha mejorado el poder separador, desde siempre muy pobre, de los radiotelescopios mediante el despliegue de la Gran Distribución (VLA, del inglés Very Large Array), un conjunto de 27 antenas, cada una de 25 metros de diámetro, distribuidas en forma de *Y* cerca de Socorro, Nuevo México. El instrumento, que es de hecho un telescopio de 27 kilómetros de diámetro, puede resolver objetos separados por distancias angulares pequeñas, del orden de 0,6 segundos de arco. Esta resolución, que es 200 veces superior a la de cualquier otro radiotelescopio, rivaliza con la resolución de los mejores instrumentos ópticos.

Los días 23 y 24 de junio de 1979, David H. Roberts, Perry E. Greenfield y Bernard F. Burke, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, obtuvieron 42 minutos de datos sobre los quasars gemelos con el VLA. En esa época sólo estaban en funcionamiento 14 de las 27 antenas del VLA, pero los datos hicieron posible alcanzar una resolución de 0,8 segundos de arco, es decir, 7,5 veces superior a la resolución de la fotografía óptica de la página 35 en la cual los gemelos difícilmente pueden verse como dos imágenes distintas. Al principio, la radiofotografía pareció confirmar la hipótesis de la lente gravitatoria, porque reveló dos radioimágenes de aproximadamente el mismo brillo correspondientes a las dos imágenes ópticas. Pero la fotografía suministró la primera vista del espacio entre los gemelos, y, a las longitudes de onda de radio, no había prueba convincente de la emisión procedente de un objeto a medio camino entre ellos. Esto en sí no invalida la hipótesis de la lente gravitatoria. Una galaxia elíptica, que los astrónomos ópticos habían sugerido como más probable candidato para lente, es con frecuencia una débil fuente de radioondas. En otras palabras, podría haber una galaxia elíptica entre las imágenes de los gemelos, pero podría ser demasiado débil para ser detectada en longitudes de onda de radio.

A los defensores de la hipótesis de la lente gravitatoria les preocupaba sobremanera dos manchas de radioemisión justamente al Nordeste de la imagen del quasar septentrional. Si era una lente gravitatoria lo que había duplicado la imagen del quasar, debería hacer lo mismo con otras imágenes en la vecindad inmediata. ¿Por qué no

había imagen de las manchas al Nordeste cerca de la imagen del quasar meridional? Es posible que las manchas sean simplemente un grupo de radioemisiones mucho más cerca del sistema solar que los quasars o la lente. En tal caso, no sería de esperar segunda imagen de las manchas. Ahora bien, ese alineamiento accidental con los gemelos resulta improbable. Por tanto, la ausencia de radioimagen de ninguna de las dos manchas al Nordeste próxima a la imagen del quasar meridional condujo a los investigadores del MIT a concluir que los gemelos no son imágenes generadas por una lente gravitatoria, sino dos quasars diferentes, uno de los cuales tiene dos manchas de emisión asociadas con él.

Las dos interpretaciones irreconciliables estaban claramente delimitadas. A un lado, los astrónomos ópticos; éstos defendían la hipótesis de la lente gravitatoria porque cualquier interpretación convencional conduce a conclusiones absurdas acerca de la energía, masa y orientación de la nube eyectada. Al otro, los radioastrónomos, partidarios de una explicación convencional que evitara los valores absurdamente exagerados suponiendo que uno de los quasars había eyectado sólo una nubecilla dirigida hacia nuestra galaxia y dotada de rotación en el plano del cielo. Los radioastrónomos citaban la ausencia de segunda imagen de las manchas del Nordeste como prueba suficiente para invalidar la hipótesis de la lente gravitatoria.

Cuando los gemelos reaparecieron en el cielo nocturno en noviembre de 1979, muchos telescopios ópticos estaban apuntados para observarlos, pero Alan N. Stockton, de la Universidad de Hawai en Manoa, y un grupo de los Observatorios Hale serían quienes finalmente resolverían el enigma de los gemelos. A pesar de las dificultades de este método y de los resultados inconcluyentes de Adams y Boroson, Stockton trabajaba con una ventaja importante. El telescopio de 2,2 metros con el cual realiza sus investigaciones está en uno de los mejores puntos de observación del mundo: en la cima del pico de 4200 metros de Mauna Kea, en la isla de Hawai. La transparencia en Mauna Kea es excelente. Si existía una posibilidad de vislumbrar una galaxia entre los gemelos, se requerirían tales condiciones.

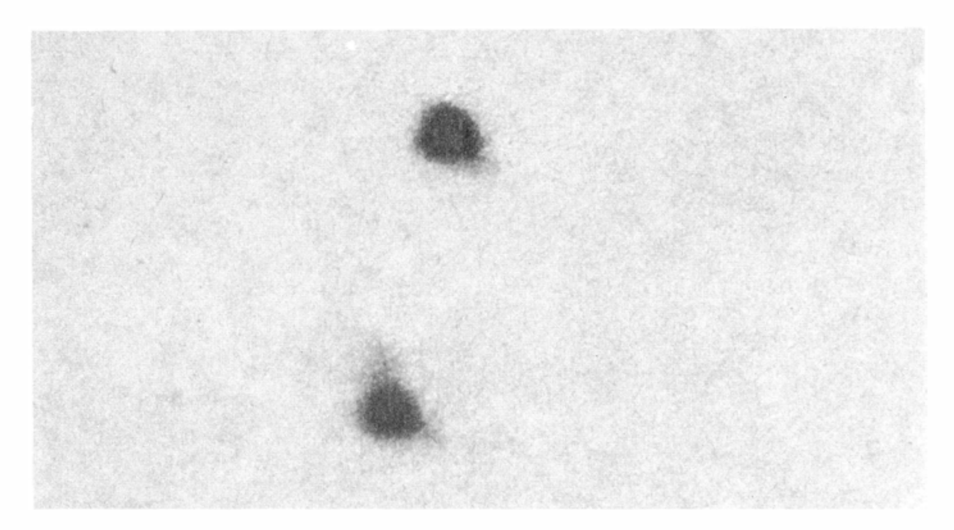
El grupo de los Observatorios Hale, integrado por Peter Young, James E. Gunn, Jerome Kristian, J. Beverley Oke y James A. Westphal, se decidió también por el método directo. Además del telescopio de cinco metros y de su extenso conocimiento de la teoría de las lentes gravitatorias, el grupo tenía acceso al mejor equipo acoplado por carga (CCD: Charge-Coupled Device) disponible: es un nuevo detector de estado sólido que probablemente reemplazará a la placa fotográfica como el principal medio de registro del astrónomo. La ventaja del CCD estriba en que en una toma puede registrar las imágenes de objetos de brillos ampliamente diferentes y permitir todavía determinar el brillo relativo de cada objeto. (Tal determinación no se puede realizar sobre una placa fotográfica por culpa de los efectos de saturación.)

El 15 de noviembre de 1979, el grupo de Hale realizó una exposición de dos horas de los quasars gemelos con el CCD. El análisis subsiguiente de la exposición mostró que la imagen meridional se alargaba hacia el Norte en un segundo de arco, y que la imagen septentrional tenía la forma circular característica de un objeto único.

El 28 de noviembre, Stockton, que no sabía de los resultados obtenidos en Hale, hizo una serie de exposiciones fotográficas de un minuto de duración bajo unas condiciones de observación soberbias. Sus fotografías mostraron una pequeña zona aparentemente vellosa al Norte de la imagen meridional. El vello parecía ser un chorro de materia procedente del gemelo meridional. Los astrónomos de Hale se dieron cuenta en seguida de que su imagen alargada y los filamentos en forma de chorro de Stockton eran el mismo objeto. Las fotografías de Stockton habían resuelto el gemelo meridional y los filamentos adyacentes, mientras que las fotografías de Hale no lo habían hecho. Sin embargo, los astrónomos de Hale advirtieron que había una débil galaxia entre las imágenes de los quasars que estaba mucho más próxima a la imagen meridional que a la septentrional. De hecho, la imagen de la galaxia casi coincide con la imagen del quasar meridional, y así, el espectro de esta imagen está sin duda contaminado por la luz de la galaxia, mucho más débil. Un estudio detallado de los resultados reveló un espectro de la galaxia superpuesto al espectro de la imagen meridional. Los observadores de Hale llegaron a la conclusión de que la galaxia tiene un corrimiento hacia el rojo de 0,4, lo que significa que se halla, aproximadamente, a medio camino entre el quasar y nuestra galaxia.

Las noticias de estos resultados se extendieron muy pronto entre la comunidad astronómica, pero el entusiasmo quedaba atemperado por molestas preguntas. Los defensores de la hipótesis de la lente gravitatoria habían creído que, para que la lente crease dos imágenes de casi igual brillo, tendría que estar casi exactamente en la visual del quasar. Además, parece que debería situarse a medio camino entre las imágenes gemelas. Si la galaxia es realmente una lente gravitatoria, ¿por qué está más próxima a la imagen meridional que a la septentrional? Y ¿dónde se encuentran las imágenes de las radiomanchas del Nordeste?

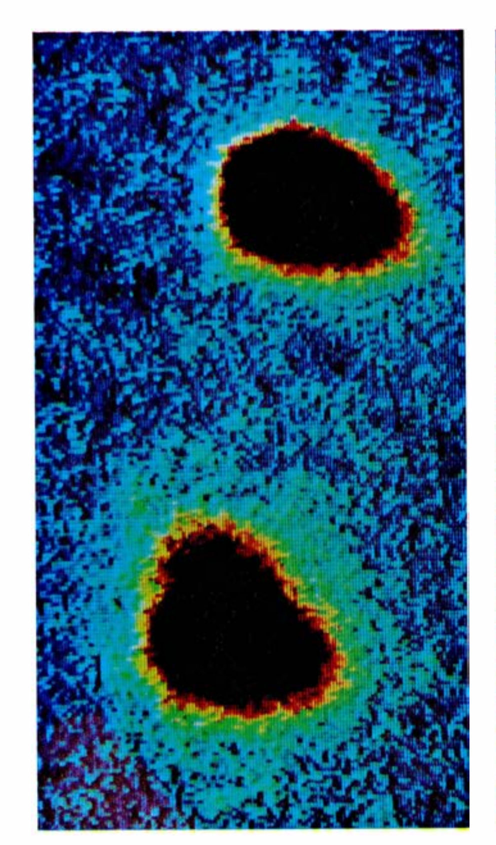
Los astrónomos de Hale dieron una respuesta convincente a ambas cuestiones. Señalaron que se había supuesto que la lente gravitatoria era una masa puntual, como pudiera serlo un agujero negro. Las propiedades de lo representado resultarían muy distintas de poseer la lente un masa extensa, la de una galaxia por ejemplo. No se hubieran planteado tales cuestiones si quienes se

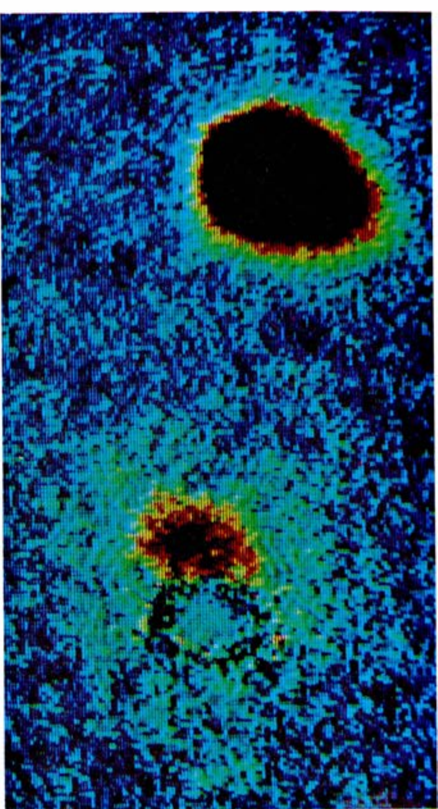


PEQUEÑA ZONA FILAMENTOSA hacia el Norte del gemelo meridional, que apareció en este negativo de una fotografía hecha con el telescopio de 2,2 metros de Mauna Kea en Hawai. La zona es una imagen imperfectamente resuelta de la débil galaxia que es la lente gravitatoria responsable de las imágenes gemelas. La fotografía fue realizada por Alan N. Stockton, de la Universidad de Hawai en Manoa.

habían esforzado por explicar los gemelos como imágenes de la lente gravitatoria se hubieran fundado en suposiciones coherentes con una masa extensa.

Los astrónomos de Hale elaboraron, con rigurosa minuciosidad matemática, las características de formación de imagen de una masa extensa. Hallaron que la diferencia más importante entre una lente puntual y una lente de masa extensa estriba en que la lente puntual produce exactamente dos imágenes, en tanto que la lente extensa puede producir desde una imagen hasta tres o quizá todavía más. Sugirieron que la galaxia produce en realidad tres imágenes de los gemelos. Dos de las imágenes están tan próximas entre sí que no se pueden resolver; el quasar meridional único no es otra cosa que su luz combinada. El quasar septentrional es la tercera imagen formada por la galaxia. Esto explica por qué la imagen meridional muestra el mismo brillo aproximado que la septentrional, a pesar de que casi coincide con la galaxia deflectora. Además, las manchas de radioemisión el Nordeste ofrecen una alineación defectuosa con la galaxia deflectora; y ésta sólo puede formar una imagen de ellas.





GALAXIA DESVIADORA, representada en falso color en estas fotografías de Mauna Kea. La representación a la izquierda se obtuvo mediante un programa de ordenador que sumó y cifró en color muchas imágenes de los gemelos. El alargamiento tanto del gemelo septentrional como del meridional en la dirección de las cuatro del reloj obedece a un defecto de alineación de la óptica del telescopio. Stockton ajustó la imagen septentrional de manera que tuviera el mismo brillo que la meridional. La representación de la derecha se realizó restando la imagen septentrional ajustada (*arriba*) de la meridional no ajustada (*abajo*). Lo que queda es una imagen de una galaxia a un segundo de arco del Norte del gemelo meridional. (Ambas composiciones fueron realizadas por el propio Alan N. Stockton.)

El cuadro final de los quasars gemelos es el que aparece en la ilustración de la página 39. El quasar real es un único punto óptico con dos extensas manchas de radioemisión al Nordeste. Aproximadamente a mitad de camino entre los quasars y nuestra galaxia hay una galaxia elíptica situada unos tres segundos de arco al Sur de la recta que uniría el quasar real y el sistema solar. La galaxia forma tres imágenes del quasar lejano; una de ellas está desviada hacia el Norte de la posición verdadera del quasar y las otras dos, desviadas hacia el Sur, de suerte que casi se superponen. En cuanto los astrónomos advirtieron que la lente gravitatoria no correspondía a una masa puntual sino extensa, pudieron explicar tanto el brillo relativo de los gemelos como la imagen única de las dos manchas extensas de radioemisión.

He simplificado un poco el cuadro final. Los astrónomos de Hale demostraron que, dependiendo de la distribución de la masa en la galaxia desviadora, las tres imágenes del quasar podrían ser diferentes de las que he descrito. Por ejemplo, una cierta distribución de masa haría la tercera imagen óptica coincidente con la galaxia misma, de modo que los observadores sólo contemplarían las otras dos imágenes. Además, la desviación de la luz del quasar no se debe a una galaxia elíptica en exclusividad. Dicha galaxia resulta ser el miembro más brillante de un cúmulo de unas 60 galaxias situadas a medio camino del quasar.

Ninguna de esas complicaciones resta valor alguno a la significación de 0957 + 561 A, B. Como primer caso de formación de imágenes por una lente gravitatoria, los gemelos deberían ayudar a disipar ciertos focos de terca resistencia en la comunidad astronómica contra la idea de los quasars como objetos distantes. Las pruebas de que el quasar 0957 + 561 se halla mucho más alejado de nosotros de lo que está la galaxia desviadora son irrefutables. En otras palabras, el quasar no puede encontrarse dentro de nuestra galaxia o próximo a ella, sino que debe estar a una distancia "cosmológica".

Hay otros puntos de discusión de carácter cosmológico que se irán aclarando a medida que se descubran nuevos casos de formación de imágenes por lentes gravitatorias. De hecho, la primavera pasada, un grupo dirigido por Weymann y David W. Latham, del Centro de Astrofísica del Harvard College Observatory y el Observatorio Astrofísico Smithsoniano, descubrieron trabajando con el MMT el primer quasar triple, PG 115 + 08. El triplete, que todavía ha de ser estudiado en detalle, son presumiblemente tres imágenes (y posiblemente más) de un quasar distante cuya radiación ha sido desviada por una lente gravitatoria.

Así termina la historia precoz de los quasars gemelos. En el breve intervalo de ocho meses desde su descubrimiento, han logrado desencadenar una de las investigaciones más intensas jamás concentradas en un objeto celeste único. Han suministrado pruebas ciertas de que la formación gravitatoria de imágenes tiene lugar realmente en la naturaleza, y de que la teoría general de la relatividad se puede aplicar a la explicación de fenómenos distantes millones de años-luz tanto como a aquellos que se producen en el sistema solar. Por último, los quasars gemelos prueban que aunque tiempo atrás, en palabras de Einstein, "no había gran probabilidad de observar (el) fenómeno", los avances de la tecnología y la perseverancia de ciertos astrónomos individuales mejoraron tal probabilidad hasta alcanzar el éxito.

Ciencia y sociedad

Nobel de economía

En algunas ocasiones los fallos de la Academia sueca sorprenden incluso a los especialistas del área; en otras muchas, se reconocen ampliamente los muchos méritos del galardonado, aunque pocos hubieran sido capaces de predecir su nominación; en muy contados casos "se sabe" de antemano que un investigador será premio Nobel y sólo queda como incógnita el año en que será recompensado. Con Lawrence Klein, nos encontramos ante una de esas escasas figuras que gozan de un reconocimiento general. Así han sido frecuentes declaraciones como la que se recoge en un número de "Pennsylvania Gazette" de hace ya casi seis años: "Muchos de los colegas de Klein le describen como un genio. Algunos de ellos dan por seguro que si no le conceden el premio Nobel de economía este año, será el año próximo" (P. McLaughlin [1975], "The Age of Klein", Pennsylvania Gazette, febrero 1975, págs. 30-34).

Para valorar la magnitud de la figura de Klein, es preciso dedicar alguna atención al terreno que constituye su especialidad, situar su obra en este contexto y comentar a partir de esta base los datos más significativos de la vida de este norteamericano nacido en Nebraska hace ahora 60 años. Dentro del campo general de la ciencia económica, Klein ha sido uno de los puntales básicos sobre los que se ha edificado la moderna econometría, cuyo objetivo más significado es cuantificar las leyes económicas que rigen el comportamiento actual y futuro de una nación, un sector, una empresa, una región...

Cada aspecto significativo del sistema económico en estudio constituye una variable de un sistema de ecuaciones matemáticas que tratan de recoger en forma suficientemente aproximada el comportamiento real de dicho sistema. La historia reciente del comportamiento del sistema suministra la información necesaria para cuantificar el conjunto de relaciones matemáticas establecidas, al que denominamos "modelo econométrico".

Utilizaremos, como ilustración de estas ideas, un modelo muy simplificado de la economía de los Estados Unidos, propuesto por el propio Klein en 1950 y que no pasamos a comentar a fin de no entrar en una terminología más especializada.

Naturalmente, un modelo econométrico real puede tener no ya seis ecuaciones –como el aquí incluido– sino varias decenas, cientos e incluso más de mil ecuaciones. Klein, que ha sido un pionero en la utilización de modelos con los más diversos grados de complejidad, propone mirar la economía como parte de un "gigantesco sistema de ecuaciones". "Cada transacción que tiene lugar en cada momento forma parte del comportamiento dinámico de este sistema de ecuaciones. Nosotros tratamos de obtener una aproximación simplificada de este universo a través de los modelos econométricos, utilizando métodos de inferencia estadística para determinar los parámetros básicos del sistema. Y ajustamos los datos del mundo real –estadísticas de producción, precios...– a estos hipotéticos modelos del universo. Utilizamos los modelos para estudiar la historia –proyectando hacia atrás y reanalizando la historia en esos términos– o bien proyectamos hacia adelante. Esto es, realizamos un análisis estadístico, matemático, de la teoría económica usando datos del mundo real para estimar la estructura de la economía".

Presentado el campo de especialización de Lawrence Klein, los modelos econométricos, podemos pasar ahora a considerar algunos de los aspectos –aquellos más comprensibles sin entrar en detalles técnicos– que le han valido su reciente premio Nobel y, a lo largo de toda su vida, la consideración y el respeto de sus colegas.

Aunque se considera como fecha simbólica de nacimiento de la econometría la constitución, hace ahora 50 años, de la "Econometric Society" (29 de diciembre de 1930 en Cleveland, Ohio), no es hasta poco antes de la Segunda Guerra Mundial cuando el económetra holandés Jan Tinbergen (también premio Nobel) propone sus primeros modelos econométricos para Holanda (1937) y Estados Unidos (1939). En 1947 presenta Klein su tesis doctoral (a sus 26 años) y ya anuncia su futuro campo de especialización: "El problema de nuestra habilidad para realizar predicciones adecuadas es puramente técnico. El autor está actualmente intentando construir modelos estadísticos, que proporcionen dichas predicciones y creemos que las dificultades del problema pueden ser superadas..." (L. Klein [1947], "The Keynesian Revolution". Macmillan).

A partir de aquí, sus trabajos constituyen una profundización continua en la construcción y aplicación operativa de modelos econométricos con un nivel creciente de complejidad: *1*) En 1950 trabaja en la Cowles Commission en la

$$C = \alpha_0 + \alpha_1 (W_1 + W_2) + \alpha_2 \pi + u_1$$
$$I = \beta_0 + \beta_1 \pi + \beta_2 \pi_{-1} + \beta_3 K_{-1} + u_2$$
$$W_1 = \gamma_0 + \gamma_1 (Y + T - W_2) + \gamma_2 (Y + T - W_2)_{-1} + \gamma_3 t + u_3$$
$$Y + T = C + I + G$$
$$Y = W_1 + W_2 + \pi$$
$$\triangle K = I$$

C	= Consumo privado
W_1	= Salarios pagados por el sector privado
W_2	= Salarios pagados por el sector público
π	= Beneficios (el subíndice −1 cuando existe, significa que la variable está referida al período anterior)
I	= Inversión privada
Y	= Renta nacional
T	= Impuestos
t	= Tiempo (año de referencia)
G	= Gasto público
K	= Capital privado ($\triangle$ significa incremento anual)
u	= Variable aleatoria que recoge los efectos conjuntos de otras variables no consideradas explícitamente en la ecuación correspondiente.
α, β, γ	= Parámetros del modelo que se estimarán en base a los datos disponibles sobre las variables en forma tal que reproduzcan lo más fielmente posible el comportamiento real observado de la economía.

Modelo econométrico de los Estados Unidos propuesto por Klein en 1950

elaboración de un modelo econométrico que fue el primero utilizado para predecir la economía de transición de la post-guerra en los Estados Unidos. *2*) Durante los siguientes cuatro años trabaja (en colaboración con A.S. Goldberger) en el primero de los modelos que se desarrollarán en la Universidad de Michigan. *3*) En 1955-58 supervisa, como profesor de la Universidad de Oxford, la construcción de un modelo para Gran Bretaña. *4*) A lo largo de los dos cursos siguientes, ya en su actual Universidad de Pennsylvania, diseña su primer modelo Wharton (el nombre se debe al de un filántropo americano que da su título a la facultad de economía de Pennsylvania) e inicia en el Departamento de Comercio un modelo que será el antecesor de los actuales del "Bureau of Economic Analysis". *5*) A partir de 1961, en colaboración con F. Gerard Adams, investiga nuevas posibilidades de los modelos macroeconométricos y diseña un modelo del mercado mundial de mercancías. *6*) En 1963, Klein y Adams inician un proyecto aún más ambicioso: desarrollar un macromodelo para Estados Unidos que permita una predicción sistemática de su economía, trimestre a trimestre. Durante 18 años, cada tres meses (con más frecuencia si algún acontecimiento importante así lo requería) ha estado presente, para su utilización por instituciones públicas y privadas, la predicción de Lawrence Klein y sus colaboradores sobre la marcha de la economía norteamericana. *7*) Durante la segunda mitad de los años 60, Klein dirige la experiencia más ambiciosa, desde el punto de vista metodológico, en relación con la construcción de un modelo econométrico. Un número importante de destacados investigadores de diversas universidades y otras instituciones norteamericanas diseñan un modelo de varios miles de ecuaciones. El "Brookings Quarterly Econometric Model" (su nombre corresponde al de la fundación que financia sus trabajos) se convierte así en uno de los más amplios proyectos en el campo de la investigación econométrica mundial. *8*) En 1969, Klein constituye un centro autónomo especializado en predicción económica, "Wharton Econometric Forecasting", que amplía sus trabajos de modelización a nivel de sectores específicos, regiones,... y con horizontes de predicción a corto, medio y largo plazo. *9*) Durante los años 70, Klein ha hecho realidad, además, su proyecto quizá más ambicioso: modelizar la economía de los principales países del mundo y conectar sus modelos entre sí. Los proyectos LINK y ORBIS han supuesto una nueva etapa en la utilización de modelos econométricos.

Ahora pensamos que es cuando pueden cobrar todo su significado para el lector algunos datos seleccionados de la vida de Lawrence Klein. En 1942 termina sus estudios de primer ciclo en la Universidad de California (recibiendo el premio Phi Beta Kappa), dos años más tarde se recibe de doctor en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y a partir de aquí su curriculum resulta ya de muy difícil resumen. Miembro del "Social Science Research Council" (1946-48), investigador asociado en la "Cowles Commission" (1944-47), consultor del gobierno canadiense (1947), investigador asociado del "National Bureau of Economic Research" (1948-51), profesor universitario primero en la Universidad de Michigan (1951-54), después en la Universidad de Oxford (1955-58) y, por último, en su actual Universidad de Pennsylvania.

Los reconocimientos a su labor van llegando sucesiva e ininterrumpidamente: la medalla John Bates Clark (para economistas de menos de 40 años) en 1959, la presidencia de la Econometric Society en 1960, el nombramiento académico de la American Academy of Arts and Sciences en 1962, su elección como presidente de la asociación de economistas americanos en 1970. Su influencia en las instituciones económicas americanas se multiplica (Committee of Economic Stability, Committee on International Relations, Committee of Price Research, Brookings Institution, Social Science Research Council, Strategic Studies Center...) e incluso actúa como coordinador del "Economic Task Force" del ex-presidente Carter durante su primera campaña presidencial de 1976.

En nuestro país, como en tantos otros, sus libros y trabajos han servido de guía a muchas generaciones de economistas. Hace ya tres años, la Universidad Autónoma de Madrid acordó el nombramiento de Klein como profesor "honoris causa" y un grupo de económetras españoles venimos desde 1977 trabajando con él y su equipo de Wharton en la construcción de un nuevo modelo econométrico para España. (Antonio Pulido.)

Nobel de física

El Nobel de física 1980 se ha concedido a dos científicos norteamericanos, J.W. Cronin y V.L. Fitch, por "su descubrimiento de la violación de principios fundamentales de simetría en la desintegración de los mesones κ neutros". James Watson Cronin, de 49 años, casado y con tres hijos, nació en Chicago, en cuya universidad da clases de física desde 1971. Val Logsdon Fitch, de 57 años, casado y con dos hijos, nació en Merryman (Nebraska). Fue investigador en la Universidad de Columbia y es profesor de física en la Universidad de Princeton desde 1954.

La simetría ha sido siempre una idea fascinante para la mente humana. La naturaleza exhibe diversos tipos de simetría en los objetos que vemos a nuestro alrededor. Pero el problema que vamos a considerar no se refiere a esta simetría de los objetos, sino a las simetrías que existen en las leyes básicas del mundo físico, responsables de los fenómenos observados. "Algo" es simétrico si hay una operación que podemos realizar tal que, después de haberla realizado, ese "algo" se comporta igual que inicialmente. En el contexto de los fenómenos físicos, nos preguntamos por el tipo de operación a que puede someterse una situación física en un experimento, manteniendo el mismo resultado.

El concepto de simetría como principio operativo, con consecuencias observables, en la descripción de los fenómenos naturales ha sido una de las grandes aportaciones de la física a la cultura. Su gran empuje surgió, en este siglo, con el advenimiento de la mecánica cuántica, que ha permitido comprender la conexión existente entre los principios de simetría y las leyes de conservación observadas en la naturaleza. La existencia de leyes de conservación posibilita que la naturaleza se comporte con un cierto orden, proporcionando así un primer esquema para su estudio y comprensión. La simplicidad conceptual de las leyes de simetría es un estímulo para los físicos, y su conexión con las reglas de conservación es de los temas más bellos y profundos de la física. En situaciones en que las leyes físicas no sean conocidas con detalle suficiente para comprender el comportamiento de los sistemas físicos, el orden impuesto por las leyes de conservación permite un primer paso en el estudio de la naturaleza.

Precisemos algunas de las ideas que se han avanzado. Supongamos que el sistema físico considerado se halle en un cierto estado. Sobre el mismo efectuamos una operación que conduce a otro estado. Si en éste tenemos una descripción equivalente del sistema, en el sentido de que produce los mismos

efectos observables que el estado original, decimos que la operación realizada es de *simetría*. Si suponemos que las leyes físicas son invariantes bajo esa operación de simetría, hablamos entonces de un *principio de simetría*. Para la mayor parte de las operaciones de simetría, esa invariancia como principio fundamental conduce a la ley de conservación de algún observable del sistema físico. La simetría está ligada a un cambio, la operación, mientras persisten magnitudes conservadas como consecuencia del principio de invariancia. Frecuentemente, los datos experimentales conducen a la existencia de una ley de conservación. Ello implica un principio de simetría, obedecido por las leyes que rigen el comportamiento de la naturaleza. Ejemplos sencillos, que avalan estas consideraciones, son los siguientes. El hecho de que las leyes físicas sean simétricas para la operación de trasladar en el espacio, cuando se añaden los principios de la mecánica cuántica, implica la conservación del momento lineal. Que las leyes sean invariantes bajo rotaciones en el espacio significa que se cumpla la conservación del momento angular. En consecuencia, estas leyes de conservación parten de la suposición de que el espacio es homogéneo e isótropo, respectivamente. Esas conexiones son muy interesantes. Decimos que los observables momento lineal y momento angular son constantes del movimiento. En todo instante, esos observables mantienen el mismo valor.

Vamos ahora a considerar una operación espacial, la paridad o reflexión espacial, consistente en cambiar de signo las tres coordenadas: $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$. Esta operación no puede obtenerse mediante rotaciones. Sin embargo, sí puede obtenerse a través de las operaciones sucesivas de una reflexión especular más una rotación. Así pues, admitido el principio de la invariancia bajo rotaciones, la pregunta asociada a la operación de paridad (P) es equivalente a la de la simetría por reflexión en un espejo. El mundo reflejado en un espejo, ¿se comporta idénticamente al original? O bien, como el mundo que Lewis Carroll hizo descubrir a Alicia a través del espejo, ¿se rige por leyes diferentes? En otras palabras, ¿es válida una simetría derecha-izquierda para todas las leyes de la naturaleza? Hasta hace unos pocos años se pensaba que la naturaleza siempre conservaba la paridad. Lee y Yang fueron los primeros, en 1956, en postular que las interacciones débiles, responsables entre otros fenómenos de la desintegración beta de los núcleos, violaban la paridad. Para probar esta propuesta, Wu y colaboradores estudiaron experimentalmente la desintegración

$$^{60}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}\mathrm{Ni} + e^- + \bar{\nu}$$

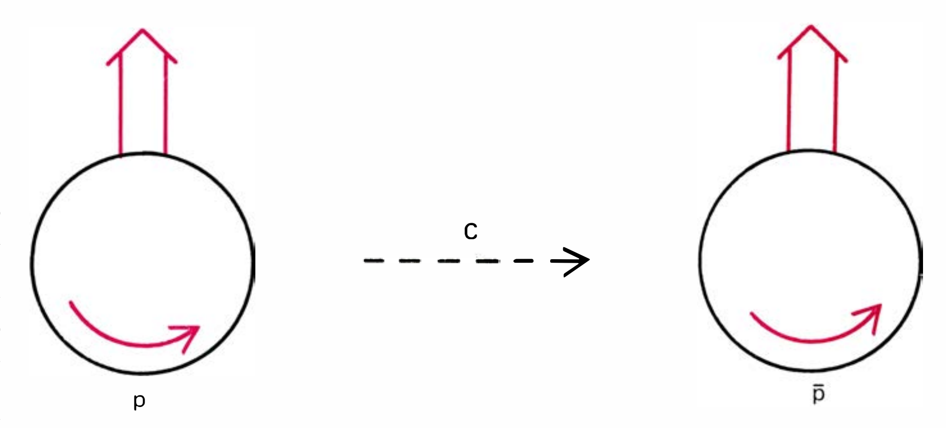
a partir de núcleos polarizados, es decir, que tienen momento angular definido según una cierta dirección conocida (donde e designa el electrón y $\bar{\nu}$ el antineutrino.) Se midió la correlación angular entre la dirección de salida de los electrones y la dirección de polarización del núcleo original. En la ilustración de esta misma página se representa este proceso y su imagen especular. Como la polarización nuclear es un vector axial, su imagen especular cambia el sentido. Si se conservara la paridad, la imagen especular sería dinámicamente posible y el número de electrones emitidos con un ángulo θ debería ser igual al número de electrones emitidos con ángulo $180^\circ - \theta$. El resultado negativo para esta igualdad constituyó la primera indicación de que la ley de conservación de paridad se violaba por las interacciones débiles. Este descubrimiento valió a Chen Ning Yang y Tsung Dao Lee el premio Nobel de física de 1957. Experimentos posteriores, en física nuclear y de partículas elementales, han establecido claramente la violación de paridad por las interacciones débiles.

Desintegración beta de un núcleo polarizado y su imagen. La flecha en color indica la polarización nuclear y, en negro, la dirección de salida del electrón

Ahora bien, las leyes de conservación observadas en la naturaleza se refieren no sólo a observables definidos en términos de grados de libertad espacio-temporales del sistema físico. Un ejemplo clásico es el de la conservación de la carga eléctrica. Una de las aportaciones de la física de altas energías ha sido el descubrimiento de otras "cargas" internas asociadas al sistema. Algunas de esas cargas generalizadas son rigurosamente conservadas en la naturaleza. Un ejemplo de esas cargas conservadas lo proporciona, aparte de la carga eléctrica, el llamado número bariónico. Si un núcleo atómico posee un número bariónico A, suma de protones y neutrones, suceda lo que suceda al sistema el estado final seguirá teniendo número bariónico A. Las partículas elementales pueden tener número bariónico cero, como los mesones π y κ, o distinto de cero, como el protón y el neutrón. Sin embargo, existen otras "cargas" que caracterizan a las partículas elementales y que no son rigurosamente conservadas en todos los procesos de la naturaleza. Un ejemplo es la llamada extrañeza: el mesón π tiene extrañeza nula, mientras que el mesón κ tiene extrañeza distinta de cero.

Pues bien, llamamos materia a los sistemas físicos que poseen un signo convenido para cada una de las cargas. Corresponde a los constituyentes del universo ordinario en que vivimos. La antimateria se refiere a los sistemas físicos con todas y cada una de las cargas internas de signo opuesto a la materia. En consecuencia, a toda partícula se le puede asociar otra, que difiera sólo en los signos de sus cargas internas, a la que llamaremos antipartí-

cula de la primera. En el caso en que una partícula tenga todas sus cargas internas nulas, su antipartícula coincidirá con ella misma. Disponiendo de sistemas físicos de materia y de antimateria, podemos realizar una operación de paso de una a otra, manteniendo las propiedades espacio-temporales. Esta operación, llamada conjugación partícula-antipartícula C, tiene el significado preciso de cambiar el signo de todas las cargas internas del sistema. Así, un protón polarizado según la ilustración de la derecha pasa a un antiprotón polarizado en el mismo sentido. Podemos ahora preguntarnos: ¿Es válido en la naturaleza un principio de simetría bajo la operación C? En otras palabras, manteniendo las condiciones espacio-temporales del sistema, ¿se comportan idénticamente la materia y su antimateria correspondiente?



La operación conjugación partícula-antipartícula de protón (p) *a antiprotón* ($\bar{p}$) *cambia sus cargas, si bien mantiene las propiedades espacio-temporales*

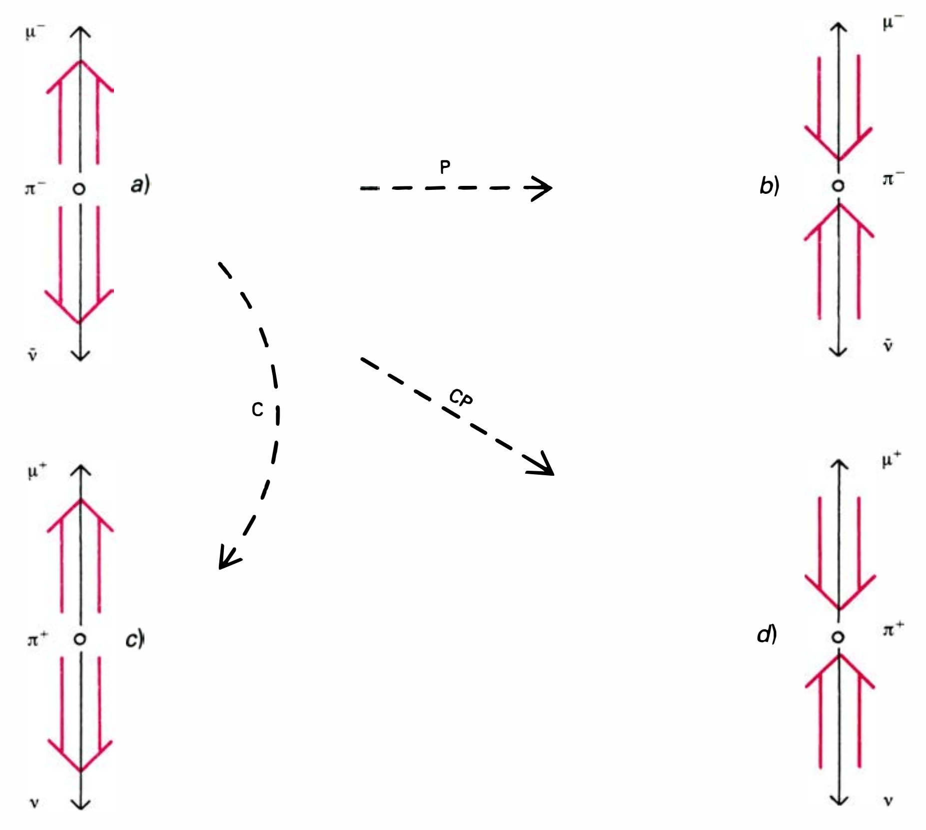
Se ha probado experimentalmente que, en todos aquellos procesos en que se viola la paridad P, hay simultáneamente violación de C. Como ilustración, tomemos el proceso de desintegración del mesón $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$, que se observa en el laboratorio con las polarizaciones de μ^- y $\bar{\nu}$ descritas en el esquema *a*) de la ilustración superior de la página siguiente, y nos preguntamos si el esquema *b*), imagen especular de *a*), y el esquema *c*), obtenido por el paso a antimateria, se observan con la misma frecuencia. La respuesta es contundente: ni el proceso *b*) ni el proceso *c*) existen. La naturaleza, a través de las interacciones débiles responsables de este y otros procesos, no se comporta simétricamente respecto a un espejo y no se comporta simétricamente tampoco para materia y antimateria.

De gran interés es la posibilidad de que la simetría derecha-izquierda se siga manteniendo si al mismo tiempo se efectúa la operación de conjugación partícula-antipartícula. Esta operación combinada CP consiste, en nuestro ejemplo de la desintegración del pion, en el paso del esquema *a*) a la configuración descrita en el esquema *d*) de la ilustración de la página siguiente. Esta posibilidad de compensar la asimetría derecha-izquierda por un paso simultáneo de materia a antimateria fue discutida independientemente por Lee y Yang y por L. Landau en 1957. Experimentalmente, el proceso transformado por CP se comporta igual que el original. En todos los fenómenos conocidos hasta 1964, la simetría CP era rigurosamente respetada por la naturaleza.

El descubrimiento, inesperado para la comunidad científica, de la violación de CP en procesos de desintegración de los kaones neutros fue la gran aportación al problema de simetrías realizada por los científicos Cronin y Fitch, que les ha valido el premio Nobel de física 1980. El experimento de J. H. Christenson, J.W. Cronin, V. L. Fitch y R. Turlay [*Phys. Rev. Letters, 13,* 138 (1964); *Phys. Rev. 140B,* 74 (1965)] encontró que los mesones $\kappa^o{}_L$ neutros de vida media larga se desintegran a dos piones $\kappa^o{}_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ con una frecuencia relativa (al modo dominante de tres piones) del orden de 10^{-3}. Es posible probar que, si CP fuese una simetría rigurosa, el modo de desintegración de dos piones estaría prohibido. El experimento se realizó en el Brookhaven National Laboratory AGS, y se demostró que otras posibilidades sugeridas para explicar el resultado observado eran imposibles. Poco tiempo después, otros grupos de investigadores encontraron pruebas adicionales de este resultado experimental. La compensación de la asimetría derecha-izquierda por el paso simultáneo de materia a antimateria fue así destruida por los resultados de estos científicos. Decimos entonces que en la naturaleza hay violación de CP, que materia y antimateria no se comportan idénticamente aunque efectuemos su imagen especular. Hasta hoy, esta violación minúscula ha sido observada tan sólo en las desintegraciones de los kaones neutros.

Por su conexión con el problema de la simetría CP, discutamos ahora la *inversión temporal T.* Se denomina inversión temporal a aquella operación de simetría que hace pasar de un sistema físico a otro en el que se ha invertido el sentido de la evolución temporal. No hay nada de ciencia ficción en esta operación de evolución "hacia atrás". Clásicamente, sustituir cada trayectoria $\vec{r}\ (t)$ por la invertida temporal $\vec{r}\ (-t)$ corresponde a decir que se recorre la trayectoria invirtiendo el sentido de las velocidades en cada punto, según se expresa en la ilustración inferior de la página siguiente, donde en ambos casos $t_1 > t_o$. Ahora, la pregunta importante es la siguiente: si la trayectoria original es dinámicamente posible, ¿lo es su transformada por inversión temporal? En caso de respuesta afirmativa decimos que hay invariancia bajo la operación T. La reversibilidad temporal de los fenómenos naturales es la cuestión planteada en esta posible simetría. En los últimos años de la década de los 60, varios autores mostraron que los resultados de la desintegración de los mesones κ neutros podían aprovecharse para investigar la invariancia bajo inversión temporal. Mediante experimentos muy precisos, analizados por Kleinknecht en la Conferencia de Altas Energías de Londres en 1974, se demostró que hay violación de T en los mismos procesos en que hay violación de CP, siendo la magnitud de la violación del mismo orden que la descubierta por Cronin y Fitch. En consecuencia, la posibilidad de que la naturaleza presente una evolución reversible con el tiempo no corresponde a una simetría rigurosa, debido a la violación minúscula de la invariancia bajo inversión temporal.

Aparte del interés intrínseco del problema de la operación de simetría T, su conexión con el tema aquí discutido –la violación de CP– proviene de un potente teorema que los físicos teóricos probaron en la década de los 50. Bajo hipótesis muy generales, aceptadas por la comunidad científica, el teorema CPT establece que la naturaleza ha de respetar rigurosamente el principio de simetría asociado a la operación combinada de conjugación partícula-antipartícula, paridad e inversión temporal. Aceptado el teorema, es evidente que la violación de CP observada por



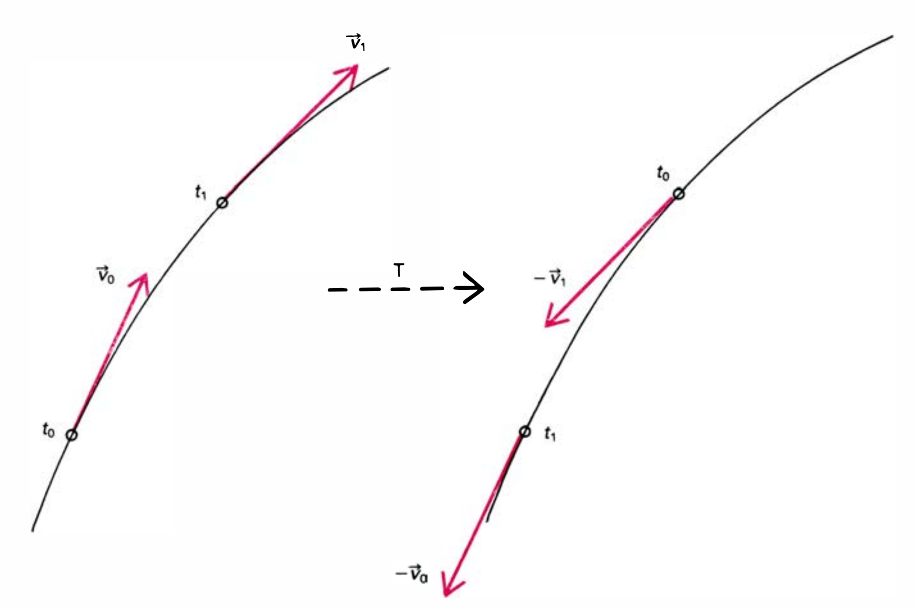
Se ha probado experimentalmente que, en todos los procesos en que se viola la paridad P, hay simultáneamente violación de C. En la figura se toma a modo de ejemplo el proceso de desintegración del mesón $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$ con las polarizaciones descritas en a *(arriba, a la izquierda). Los tres procesos restantes (*b, c *y* d*) corresponden a los transformados de* a *por P, C y CP*

Cronin y Fitch tenía que venir acompañada por violación de T. Sin embargo, el sucesivo derrocamiento de simetrías consideradas en los años 50 como rigurosas [P, C y CP] provocó un planteamiento de la operación CPT como simetría que debía someterse a test experimental. A partir de todas las experiencias realizadas en kaones neutros y otras partículas elementales, es posible concluir que, dentro de la precisión experimental, CPT es una simetría rigurosa de la naturaleza. Con este bagaje experimental y teórico, asociamos automáticamente el problema de CP con el de T. La naturaleza escoge una asimetría materia-antimateria, incluso si simultáneamente se pasa de derecha a izquierda, y esta asimetría está ligada a una violación del principio de reversibilidad temporal.

Los procesos en que se ha observado violación de CP y violación de T obedecen a las interacciones débiles existentes en la naturaleza. En los últimos años se ha desarrollado una teoría coherente de estas interacciones, mediante su unificación con las conocidas interacciones electromagnéticas. Este proceso representa un paso gigantesco en la comprensión de las fuerzas responsables del comportamiento del mundo natural, desde que J.C. Maxwell unificara electricidad y magnetismo a mediados del siglo XIX. Las aportaciones fundamentales a la teoría unificada de interacciones electro-débiles han sido realizadas por S. L. Glashow, A. Salam y S. Weinberg, a quienes se concedió el premio Nobel de física en 1979. Aunque la teoría no exige que exista violación de CP, sí permite su incorporación mediante un mecanismo natural. Este proviene de cómo se engendra la masa de las partículas materiales, pero una predicción cuantitativa no es todavía posible. Si el origen de la violación de CP fuese el aportado por la teoría unificada de interacciones electro-débiles, habría otros procesos (aparte de la desintegración de kaones neutros) en que se ha predicho la existencia de un efecto observable debido a esa violación. De interés particular sería la observación de un momento dipolar eléctrico D no nulo para el neutrón, constituyente de los núcleos atómicos, y cuyo límite superior es en la actualidad $D < e \times 10^{-24}$ centímetros. Se han puesto a punto programas experimentales con miras a detectar la asimetría materia-antimateria en esos procesos alternativos.

Es interesante preguntarse por qué la naturaleza, en este universo nuestro, evolucionando en un sentido con el tiempo, ha escogido distinguir la materia de la antimateria de un modo absoluto. En otras palabras, ¿qué necesidad hay de la violación de la simetría CP? La ciencia ha de proporcionar una razón, al menos, para este tipo de comportamiento. ¿Qué hecho fundamental en nuestro universo precisa de la violación de CP como ingrediente? Muy recientemente, ha habido especulaciones cosmológicas en este sentido.

La expansión de nuestro universo, desde la gran explosión inicial, ha provocado su enfriamiento al evolucio-



Una trayectoria clásica y su invertida temporal

nar: el tiempo transcurrido es inversamente proporcional al cuadrado de la temperatura. Observamos que contiene fundamentalmente materia, es decir, no es simétrico respecto de materia y antimateria. ¿Es posible explicar la densidad de materia neta en el universo? El modelo cosmológico "dominante" ha sido considerado como una buena aproximación al universo real para temperaturas inferiores a unos 10^{12} grados, correspondientes a tiempos posteriores a 10^{-4} segundos desde la explosión inicial. Por encima de esas temperaturas, las densidades y energías puestas en juego son tan altas que los intentos de conocer la evolución cósmica en tiempos anteriores tenían que ser considerados como muy especulativos. Sin embargo, los físicos de altas energías poseen en ese universo inicial un excelente "laboratorio" para discutir las ideas que han surgido a partir del estudio de partículas elementales. Las llamadas teorías de gran unificación entre las interacciones o fuerzas de la naturaleza necesitan, para su contrastación, poner en juego muy altas energías, cuya posibilidad de alcanzarse en un laboratorio terrestre es impensable. Tales energías estaban, sin embargo, presentes en el universo inicial. ¿Por qué no especular, pues, sobre esos primeros instantes por medio de las teorías unificadas?

En efecto, algunos científicos han intentado explicar en trabajos recientes la existencia neta de materia en el universo a partir de procesos entre partículas elementales, que tuvieron lugar con frecuencias importantes en los instantes iniciales. A muy altas energías, las teorías de gran unificación predicen que la materia (y la antimateria) es inestable. A las energías actuales del universo, las frecuencias de desintegración de la materia ordinaria son extremadamente pequeñas: se sabe que la vida media del protón, núcleo del átomo de hidrógeno, es ¡mayor que unos 10^{30} años! Pero a las enormes temperaturas del universo inicial [a 10^{-36} segundos de su origen], las interacciones responsables de la inestabilidad de la materia tienen una gran intensidad. Supongamos que las fuerzas responsables de la inestabilidad de la materia violan las simetrías C y CP. Automáticamente, un universo originado en la explosión inicial con igualdad de materia y antimateria evoluciona a un estado en que hay una cantidad neta de materia. Esta, al enfriarse, es cada vez más estable y así es posible explicar la asimetría materia-antimateria del universo presente. De hecho, la argumentación presentada explica no sólo que observemos actualmente materia, y no antimateria, sino también que la densidad de materia presente en el universo sea relativamente pequeña. Estas consideraciones, que aún no están suficientemente estudiadas y comprendidas, proporcionan una razón de ser a la elección de la naturaleza de violar la simetría CP.

Hasta el presente no se ha observado la desintegración de la materia ordinaria. Hay varios grupos experimentales que, superando las grandes dificultades técnicas imaginables, pretenden hallar la desintegración del protón siempre que su vida media no sea superior a unos 10^{33} años [recordemos que la edad del universo es de 10^{10} años]. Si llegáramos a probar la inestabilidad de la materia ordinaria, equipados con la violación de CP observada por primera vez por James Cronin y Val Fitch, tendríamos entonces una explicación científica para entender por qué nuestro universo es tal como es. Además, incluso si el universo fuese abierto, podemos decir que está predestinado a caminar hacia su aniquilación por las mismas fuerzas que le originaron en su forma actual. La unidad de la ciencia es una magnífica recompensa al afán investigador: a través del estudio de los fenómenos microscópicos entre partículas elementales, se explica el origen de la materia mediante ideas que, a su vez, repercuten en la evolución cósmica del universo. (José Bernabeu.)

Nobel de química

El premio Nobel de química de 1980 se ha otorgado a los norteamericanos Paul Berg y Walter Gilbert y al inglés Frederick Sanger, por sus aportaciones al desarrollo de las nuevas técnicas de ingeniería genética de microorganismos, que han supuesto una revolución en el campo de la biotecnología.

Paul Berg, de 54 años, enseña bioquímica en la Universidad de Stanford (California); recibirá la mitad del importe del premio "por sus estudios fundamentales en bioquímica sobre los ácidos nucleicos y, en particular, sobre el ADN (ácido desoxirribonucleico) recombinante. Berg fue el primero en construir moléculas híbridas de ADN. El grupo de investigación que dirigía caracterizó y puso a punto las técnicas enzimáticas (enzimas de restricción y ADN ligasas) para la hidrólisis (separación) y unión de fragmentos diferentes de ADN procedentes de diferentes células, que, por tanto, aportaban información genética distinta. Estos primeros estudios, llevados a cabo al comienzo de la década de los 70, sirvieron para "construir" un ADN híbrido entre el ADN del virus animal SV40 y el ADN de virus bacterianos. Estas técnicas iniciales han sido luego perfeccionadas y aplicadas a un gran número de casos de recombinación de elementos genéticos.

Walter Gilbert y Frederick Sanger compartirán la otra mitad del premio por "sus contribuciones a la determinación de las secuencias de bases de los ácidos nucleicos". Gilbert, de 46 años, profesor de biología molecular en la Universidad de Harvard, ha desarrollado numerosos estudios sobre la organización del material genético en los organismos vivos. A medida que aumenta el grado de desarrollo evolutivo de los seres vivos, la información genética precisa se hace cada vez más compleja y la transcripción (es decir, la lectura) de esta información genética por las células de los seres vivos está regulada por mecanismos cada vez más complejos. Gilbert ha contribuido al descubrimiento de que el ADN de animales superiores está dividido en exones (regiones que contienen información que se expresa) e intrones (regiones que no se expresan y cuya función no está suficientemente desvelado todavía). [*Investigación y Ciencia* publicó en junio del año pasado un artículo del profesor Gilbert sobre el tema.]

Frederick Sanger, de 62 años de edad, enseña biología molecular en la Universidad de Cambridge (Inglaterra). Repite ese máximo reconocimiento, pues se le había otorgado ya en 1958 por sus trabajos sobre la estructura molecular de la insulina. Recientemente ha estudiado la determinación completa de las secuencias de las bases del ácido desoxirribonucleico del virus bacteriano $\phi X/174$, que contiene un total de 5375 pares de bases.

En conjunto, la labor de los doctores Berg, Gilbert y Sanger ha contribuido a establecer las bases para el actual desarrollo de las técnicas de ingeniería genética. Gracias a ellos pueden fabricarse hormonas humanas o interferón (un producto de las células animales que tiene actividad antivírica) con la ayuda de bacterias, en las cuales se ha introducido el ADN procedente de células animales que codifica para la formación de estas substancias. (Juan Francisco Martín.)

Carbohidratos

Los azúcares y las cadenas que forman sus unidades son los constituyentes más abundantes de la materia viva. Siguen apareciendo nuevos carbohidratos, a los que se van atribuyendo nuevas funciones en los procesos normales y patológicos

Nathan Sharon

Acidos nucleicos, proteínas, lípidos y carbohidratos constituyen las cuatro clases principales de compuestos esenciales para la vida. Durante los últimos treinta años, la atención de los químicos y biólogos se ha centrado en las tres primeras clases, desdeñando los carbohidratos; se debió ello, en parte, a la creencia de que su química y su biología se habían resuelto por completo. Sin embargo, a lo largo de la pasada década, ha resurgido la investigación en el campo de los carbohidratos y, hoy, asistimos a una rápida expansión. Fruto de los nuevos progresos, la investigación en el dominio de los carbohidratos se muestra amplia y diversa.

El estudio de los carbohidratos y sus derivados ha enriquecido notablemente la química, de modo particular lo referente al papel que desempeñan la forma y configuración moleculares en las reacciones químicas. Las recientes investigaciones, en concreto, han influido de una manera decisiva en la caracterización de diversos antibióticos y agentes antitumorales. Se ha llegado así al descubrimiento de nuevas reacciones biosintéticas y mecanismos de control enzimático, y se han registrado avances significativos en la comprensión de muchos procesos biológicos fundamentales; así ha ocurrido, por ejemplo, a propósito de la interacción entre la célula y su entorno y entre células. Apoyados en tales logros, los científicos vislumbran nuevos y revolucionarios métodos para combatir las infecciones bacterianas y víricas y hacer llegar el fármaco hasta la célula o el órgano enfermo. La profundización en la bioquímica de los carbohidratos nos ha dotado también de elementos para reconocer la deficiencia enzimática subyacente a varias enfermedades genéticas, al tiempo que da fuerza a la esperanza de obtener un tratamiento eficaz de las mismas. Una idea en la que se apoyan muchos de los recientes hallazgos, idea que constituye, además, una potente fuerza motriz en esta área de investigación, es la de que los monosacáridos (las unidades básicas de los carbohidratos) puedan servir, al igual que los nucleótidos y los aminoácidos, de palabras codificadoras en el lenguaje molecular de la vida; en otros términos: la especificidad de muchos compuestos normales está escrita en una secuencia de monosacáridos.

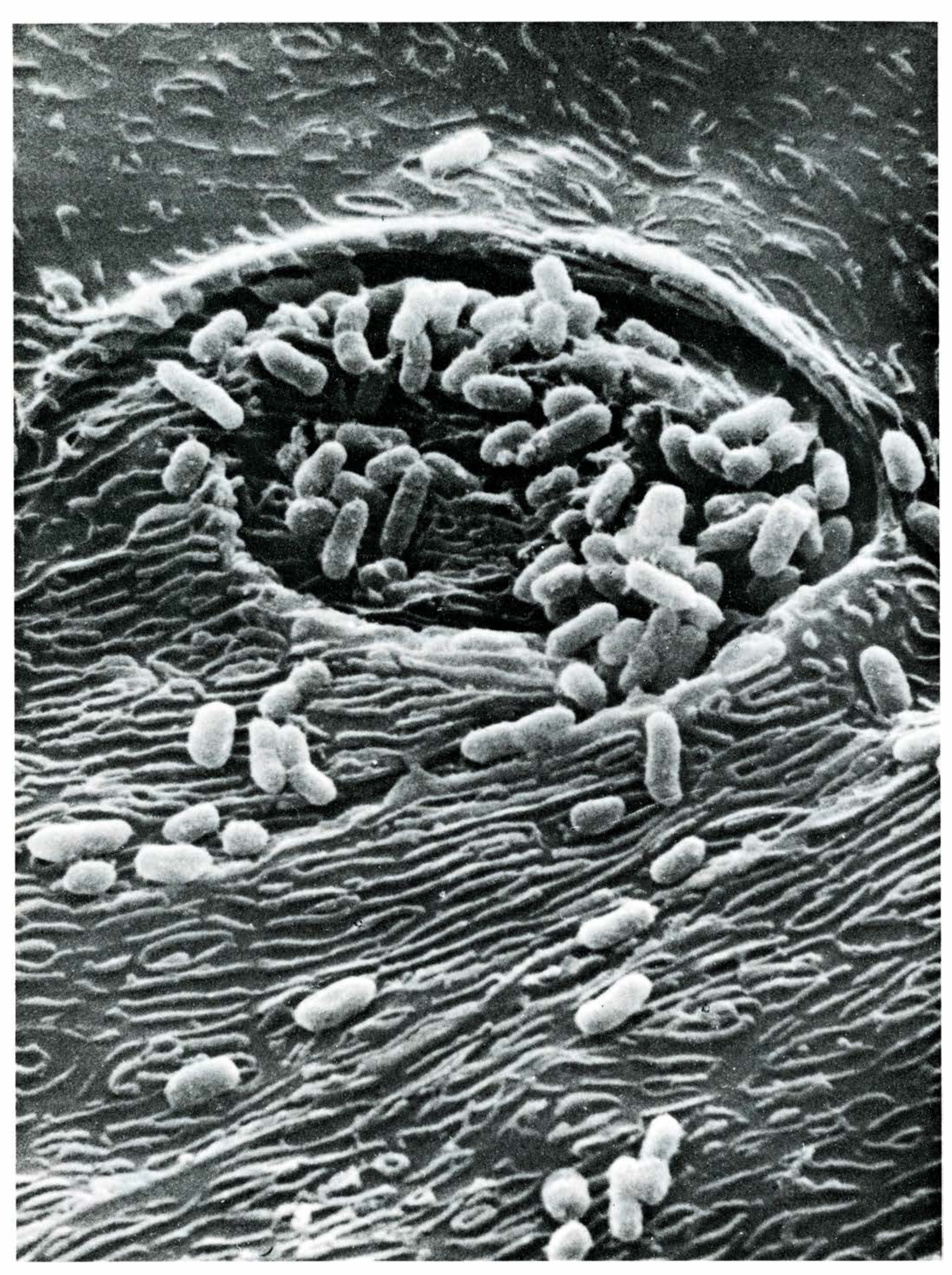
Los carbohidratos son azúcares o (como el almidón y la celulosa) cadenas de azúcares. A lo que la mayoría de la gente llama azúcar, una sustancia alimenticia común, se conoce en química por sacarosa. La molécula de sacarosa consta de dos monosacáridos, o azúcares simples, glucosa y fructosa, enlazados entre sí; se trata, por tanto, de un disacárido. En la naturaleza se han encontrado más de 200 monosacáridos diferentes, todos ellos químicamente relacionados con la glucosa o la fructosa. Por regla general son sólidos cristalinos blancos que se disuelven bien en agua. Algunos no han podido obtenerse en cantidad suficiente para confirmar su sabor dulce, a pesar de lo cual siguen llamándose azúcares, como es el caso de ciertos monosacáridos que no son dulces.

El monosacárido mejor conocido es la glucosa. Y es probable que se haya investigado con mayor intensidad que ningún otro compuesto orgánico. Conocida ya por los antiguos por su presencia en la miel granulada y en el mosto de uva. Se encuentran referencias al azúcar de uva, la glucosa, en escritos árabes del siglo XII. En 1747, el farmacéutico alemán Andreas Marggraf, cuyo aislamiento de sacarosa pura a partir de remolacha es uno de los mejores ejemplos de la habilidad química de su tiempo, escribió sobre el aislamiento a partir de pasas de uva de "eine Art Zucker" (un tipo de azúcar, diferente del de la caña de azúcar); aludía a lo que ahora entendemos por glucosa. Se demostró que la acción de los ácidos sobre el almidón producía un jarabe dulce, del que Constantine Kirchoff aisló azúcar cristalino en 1811. Investigadores posteriores establecieron que el azúcar de uva era idéntico al hallado en la miel, en la orina de los diabéticos y en hidrolizados ácidos de almidón y celulosa. El químico francés Jean Baptiste André Dumas le dio el nombre de glucosa en 1838. La estructura de ésta y de otros varios monosacáridos, fructosa, galactosa y manosa incluidas, se estableció hacia 1900, gracias, sobre todo, al brillante trabajo del químico alemán Emil Fischer, quien, de ese modo, puso los cimientos de la química de los carbohidratos.

Los monosacáridos raramente se presentan como tales en la naturaleza. Se encuentran en forma de derivados, a partir de los cuales pueden liberarse por hidrólisis con ácidos minerales acuosos o con enzimas. Entre los derivados predominan los polisacáridos, constituidos por unidades de azúcar que integran moléculas gigantes; tales macromoléculas contienen hasta 26.000 monosacáridos (como en la celulosa del alga *Valonia*). También abundan los oligosacáridos, compuestos formados por dos a diez monosacáridos. Los azúcares se encuentran frecuentemente en combinación con otras sustancias naturales.

"Agua de carbono"

El nombre de carbohidrato se asignó originalmente a los compuestos considerados hidratos de carbono, es decir, formados por carbono, hidrógeno y oxígeno según la fórmula general $C_n(H_2O)_n$. La verdad es que la glucosa y otros azúcares simples, como la galactosa, la manosa y la fructosa, tienen la fórmula general $C_6H_{12}O_6$. Son hexosas típicas, es decir, portadoras de seis átomos de carbono. A medida que se fue disponiendo de una cantidad de información mayor, la definición se ha modificado y ampliado para abarcar numerosos compuestos con poca o



PAPEL DESEMPEÑADO EN LA SUPERFICIE CELULAR por un carbohidrato, en este caso la manosa, que puede apreciarse en esta micrografía de barrido obtenida por Frederic Silverblatt y Craig Kuehn, del Hospital para Veteranos de la Administración de Sepúlveda (California). El fondo de la micrografía está ocupado por células del tejido de la cara interior de la mejilla humana; los objetos cilíndricos blancos son bacterias de la especie *Escherichia coli*. No se observa la manosa, que se encuentra en la membrana celular, pero es el azúcar lo que provoca la adherencia de *E. coli* a la superficie tisular.

ninguna similitud con el "agua de carbono" original. Hoy en día, los carbohidratos abarcan los polihidroxialdehídos, cetonas, alcoholes, ácidos y aminas, sus derivados simples y los productos formados por la condensación de estos diferentes compuestos a través de enlaces glicosídicos (esencialmente puentes de oxígeno): oligómeros (oligosacáridos) y polímeros (polisacáridos).

Gran parte del interés actual por los carbohidratos se centra en ciertas sustancias: las glicoproteínas y los glicolípidos; se trata de carbohidratos complejos, en los que los azúcares se unen a proteínas y lípidos, respectivamente. Reciben la denominación general de glicoconjugados. Habría que hacer notar, además, que en el interés despertado en torno a los ácidos nucleicos se olvida un detalle: también son carbohidratos complejos, pues entre sus principales contituyentes se encuentran los monosacáridos (ribosa en el ARN y desoxirribosa en el ADN).

Los carbohidratos forman el grupo más abundante de compuestos biológicos de la tierra; y el más abundante de los carbohidratos es la celulosa, un polímero de la glucosa, principal material estructural de las plantas. Otro carbohidrato abundante, la quitina, un polímero de acetilglucosamina, constituye el principal componente orgánico del exoesqueleto de muchos artrópodos, como los insectos, cangrejos y langostas, que engloban la clase más numerosa de organismos, unas 900.000 especies (más que el conjunto de familias y clases restantes). ¡Se calcula que anualmente una única especie de cangrejo elabora millones de toneladas de quitina!

Los carbohidratos son también el combustible de la vida, pues constituyen la mayor fuente de energía de los organismos vivos y la ruta principal para el almacenamiento y abastecimiento de energía para la mayoría de las células. Son los principales compuestos de retención de la energía solar para su conversión a una forma utilizable por los organismos. Según los valores calculados, en la tierra se forman cada año más de 100.000 millones de toneladas de carbohidratos a partir de agua y dióxido de carbono por el proceso de la fotosíntesis. Los polímeros de la glucosa, como almidones y glucógenos, son los compuestos de almacenamiento de energía en plantas y animales, respectivamente. El carbón, la turba y el petróleo se formaron probablemente por acción de procesos químicos y microbiológicos sobre los carbohidratos.

Los carbohidratos comprenden únicamente el uno por ciento del peso del cuerpo humano; las proteínas el 15 por ciento, las grasas otro 15 por ciento y un cinco por ciento las sustancias inorgánicas (el resto es agua). De cualquier manera, los carbohidratos son un constituyente importante de la dieta humana, pues suministran un alto porcentaje de las calorías consumidas. Los norteamericanos consumen un 40 por ciento del total de sus calorías en forma de carbohidratos (un 50 por ciento los británicos e israelitas): glucosa, fructosa, lactosa (azúcar de la leche, un disacárido de glucosa y galactosa), sacarosa y almidón.

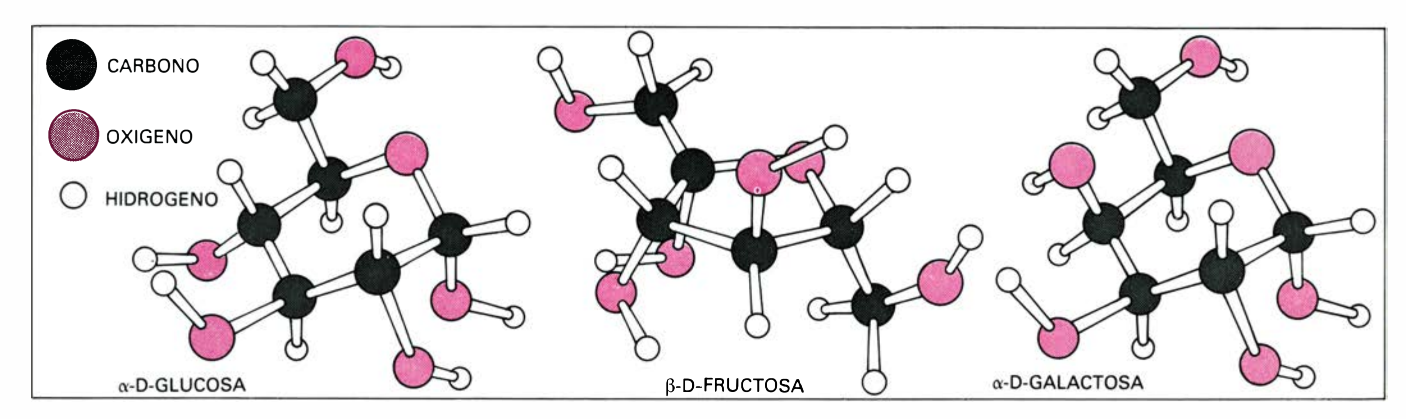
La sacarosa es el principal alimento azucarado. Su producción mundial aumentó desde ocho millones de toneladas en 1900 hasta cerca de 88 millones en 1977. Ningún otro alimento humano ha mostrado tamaño incremento de producción en el mismo período. La cantidad de sacarosa producida por una nación es un índice de su renta media. En los países más ricos, como los Estados Unidos, Gran Bretaña, Australia y Suecia, el consumo anual oscila entre 40 y 50 kilogramos de sacarosa por persona, mientras que en los más pobres, como la India, Paquistán y China, es de 5 kilogramos o menos. Se ha sugerido a menudo que una dieta rica en sacarosa puede tener efectos nocivos para la salud de los habitantes de países desarrollados, siendo hasta cierto punto responsable del incremento de determinadas enfermedades: diabetes, obesidad y caries dentarias.

Los carbohidratos constituyen la materia prima de industrias de gran importancia económica, como las de pasta de madera, papel, fibras textiles y productos farmacéuticos. El principal carbohidrato industrial es, sin duda, la celulosa: su utilización mundial se calcula en 800 millones de toneladas por año. Los polisacáridos con propiedades gelificantes, como el agar, ácido péctico y carrageninas, están implicados en las industrias alimentarias y de cosméticos.

Dificultades de investigación

Los principales polisacáridos que he mencionado –celulosa, almidón, glucógeno y quitina– son polímeros relativamente simples. Se trata de homopolímeros, término griego para indicar que están constituidos por un único tipo de monómero (glucosa o acetilglucosamina). Esta aparente sencillez estructural fue quizá motivo en el que se apoyaba el desdén de los estudiosos hacia los carbohidratos.

Otra razón importante por la que se rehuía su investigación tenía que ver con los muchos problemas de índole química que aparecieron al tratar con estas sustancias. Los azúcares son compuestos multifuncionales con varios grupos hidroxilo (−OH), normalmente cuatro o cinco para las hexosas, la mayoría de los cuales tienen aproximadamente la misma reactividad química. La manipulación de un determinado grupo hidroxilo plantea a menudo serios problemas, incluso hoy día. Sólo



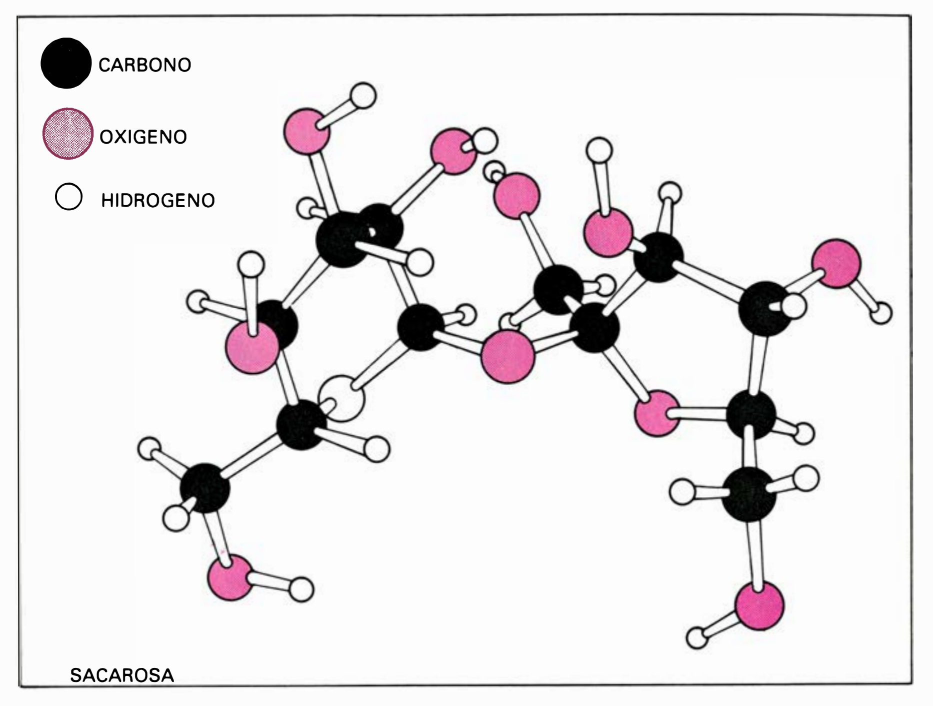
TRES MONOSACARIDOS: glucosa, fructosa y galactosa (*de izquierda a derecha*, respectivamente). Los carbohidratos son azúcares o cadenas de azúcares, cuyas unidades fundamentales son los monosacáridos. Glucosa, fructosa, galactosa y otros muchos azúcares sencillos satisfacen la definición original de carbohidratos, es decir, son hidratos de carbono constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno según la fórmula general $C_n(H_2O)_n$. Si nos referimos a la glucosa, la fructosa o la galactosa, la fórmula se convierte en $C_6H_{12}O_6$; por tener seis átomos de carbono se les ha denominado hexosas.

con gran dificultad puede bloquearse un grupo hidroxilo, o dejarlo libre, lo que requiere un plan cuidadoso y la ejecución de complejas series de reacciones. De ahí que la síntesis de un disacárido sea toda una proeza. Muy raramente se han sintetizado trisacáridos y son pocos los trabajos sobre la síntesis de sacáridos más complejos.

En la química de proteínas, por contra, es fácil sintetizar péptidos de docenas de aminoácidos, no sólo con métodos manuales, sino incluso con métodos automatizados. Se han sintetizado al menos tres proteínas: insulina (compuesta por 51 aminoácidos), ribonucleasa (124) y lisozima (129). Esta relativa facilidad de la síntesis de proteínas se debe, en parte, a que el número de pasos necesario para la preparación de un péptido es considerablemente menor que el requerido para la síntesis de un oligosacárido de tamaño similar. Más importante aún, puede obtenerse un número de oligosacáridos isoméricos (que tienen la misma composición pero distinta estructura) mucho mayor que de oligopéptidos, a partir de un mismo número de los correspondientes monómeros.

El químico se enfrenta con una complicación adicional: en tanto que las proteínas y ácidos nucleicos forman polímeros lineales, los polisacáridos suelen estar ramificados. Esta característica aumenta notablemente el número de estructuras posibles y, con ello, las dificultades del estudio de los polisacáridos. Por fortuna para los químicos de carbohidratos, muchas de las posibles estructuras no parecen producirse en la naturaleza.

Ese nuevo y reciente despertar del interés por los carbohidratos puede deberse, sobre todo, a la introducción de métodos muy mejorados. Los bioquímicos de la primera mitad de siglo basaban su investigación de las estructuras de los monosacáridos y sus derivados casi exclusivamente en transformaciones químicas cuidadosamente controladas y en mediciones ópticas (principalmente polarimetría). En esa época, el trabajo se veía aún más limitado por la ausencia de técnicas de separación adecuadas y por la necesidad de cantidades sustanciales (un gramo o más) de material para muchos de los experimentos. El advenimiento de la cromatografía en sus diversas formas y de métodos analíticos instrumentales poderosos –espectroscopía de resonancia magnética nuclear (que requiere sólo miligramos de material), espectrometría de masas (que se basta con microgramos) y análisis por difracción de rayos X– así como la disponibilidad de enzimas que actúan con gran especificidad sobre los carbohidratos han resultado en una transformación radical en el tratamiento del problema de la estructura de los carbohidratos. Además, una combinación adecuada de estas técnicas nos suministra información más rápida, pertinente y pormenorizada con una cantidad de material mucho menor. Maurice Stacey, de la Universidad de Birmingham, ha puesto de manifiesto que, para el esclarecimiento de la constitución de un nuevo carbohidrato, se habrían necesitado tres años en la década de 1930; hoy se logra en menos de tres semanas.



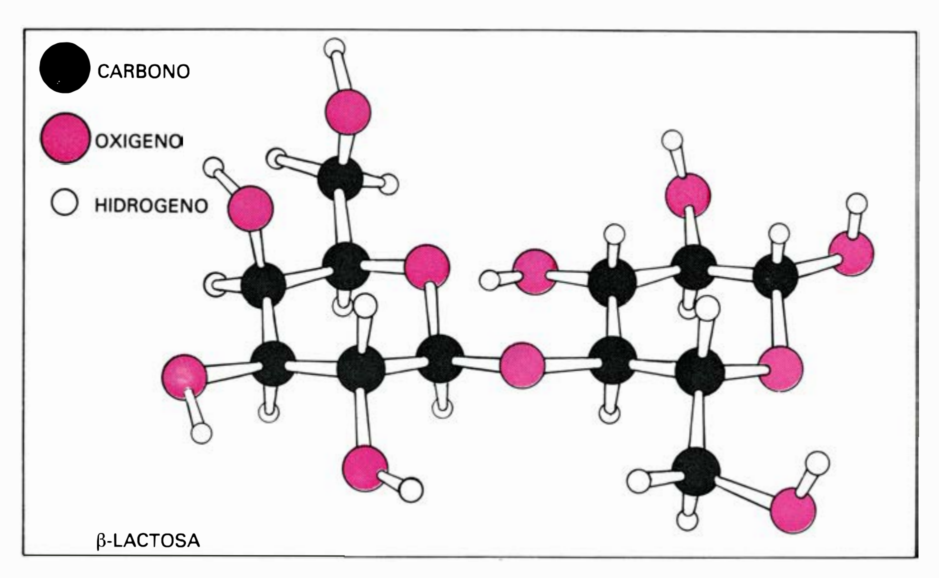
ESTRUCTURA DE LA SACAROSA, esquematizada. Al azúcar común los químicos lo llaman sacarosa. Es un disacárido, pues consta de dos moléculas de monosacáridos (glucosa y fructosa) trabadas entre sí.

Sacáridos nuevos y poco usuales

Consecuencia de la introducción de estas nuevas técnicas ha sido el descubrimiento de muchos sacáridos, simples y complejos. En los últimos años, el número de azúcares raros aislados de fuentes naturales se ha incrementado rápidamente. Han colocado al químico frente a nuevos y desafiantes problemas de determinaciones estructurales y de síntesis. Voy a ilustrar el estado actual de la cuestión tomando ejemplos de un área de mi especialidad: los aminoazúcares, azúcares en los que se han sustituido uno o varios hidroxilos por un grupo amino.

Durante el semestre de verano de 1875, un joven físico, George Ledderhose, se encontraba trabajando en el laboratorio de Friedrich Wöhler, en Göttingen, cuando su tío, Felix Hoppe-Seyler, un conocido fisioquímico, le invitó a cenar. A sugerencia de su tío llevó al laboratorio los restos de una langosta que habían servido. Allí descubrió que, al disolver las pinzas y el caparazón en ácido clorhídrico concentrado y caliente, y tras evaporación de la solución, aparecían unos cristales característicos. No tardó en identificar el compuesto cristalino como un nuevo azúcar que contenía nitrógeno, al que denominó *glucosamina.*

A lo largo de los veinte años siguientes se fue acumulando gran cantidad de información sobre el compuesto. El nuevo azúcar tenía una estructura derivada de la molécula de glucosa por reemplazamiento del grupo hidroxilo del carbono número 2 de la glucosa por un grupo amino. Con la síntesis, todavía no definitiva, del aminoazúcar realizada por Emil Fischer y H. Leuchs, en 1903, parecía resuelto el problema de su estructura. Sin embargo, la estructura de la glucosamina sólo se estableció inequívocamente en 1939, cuando Norman Haworth logró una síntesis incuestionable, que demostraba que la asignación de la estructura "gluco" para el aminoazúcar propuesta por Fischer era correcta. En 1914, P. A. Levene y Frederick B. La Forge, del Rockefeller Institute for Medical Research, aislaron un segundo aminoazúcar, la galactosamina, a partir de hidrolizados ácidos de cartílago, tendón y aorta, aunque su estructura sólo pudo establecerse firmemente en 1945, atestiguando otra vez las enormes dificultades que presentan estas sustancias. Se supuso entonces que aquel acontecimiento



LACTOSA, un disacárido compuesto por glucosa y galactosa. Es el azúcar de la leche. Con otros azúcares, piénsese en la glucosa, la fructosa y la sacarosa, es uno de los carbohidratos que constituyen un elevado porcentaje de la ingesta calórica de la dieta humana (un 50 % en Gran Bretaña e Israel).

proclamaba el fin de la cuestión de los aminoazúcares. Pero, en 1960, se habían descubierto unos 20 nuevos aminoazúcares. Hoy, su número asciende a más de 60.

El primero de los "nuevos" aminoazúcares, descubierto en 1946, fue la *N*-metil-L-glucosamina, un constituyente del antibiótico estreptomicina. Poco después se identificaron otros aminoazúcares en sustancias antibióticas. Algunos antibióticos muestran una estructura similar a la de un oligosacárido, como ocurre con las estreptomicinas, las neomicinas y otros antibióticos aminoglucósidos, como la kanamicina y las paromomicinas, todos ellos empleados clínicamente para combatir infecciones bacterianas. Otro antibiótico aminoglucósido es la puromicina, conocido inhibidor de la síntesis proteica. También son aminoglucósidos la daunomicina y la adriamicina, dos potentes agentes antitumorales, de utilidad clínica, que han probado su efectividad en el tratamiento de la leucemia aguda. Ambos contienen un 3-aminoazúcar poco común: la daunosamina.

Para conocer mejor el modo de acción de estos antibióticos y progresar en su fabricación es imperativo sintetizar análogos con diferentes aminoazúcares, pues es sabido que las propiedades estructurales de los componentes azucarados ejercen a menudo una influencia decisiva sobre las propiedades farmacológicas de los antibióticos. Este objetivo ha proporcionado un fuerte impulso al desarrollo de nuevos métodos de síntesis de aminoazúcares y ha abierto el camino para la preparación de nuevos y mejores antibióticos, de notable eficacia contra los microorganismos resistentes a los antibióticos aminoglucósidos naturales. En ningún caso, sin embargo, los monosacáridos constituyentes logran por sí solos, in vitro, matar bacterias o inhibir el crecimiento de tumores.

Hemos de destacar que varios disacáridos, como la trehalosamina, muestran actividad antibacteriana. En 1979. Herbert A. Blough y Robert L. Giuntoli, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, comunicaron que el monosacárido 2-desoxiglucosa, aplicado en el sitio de una infección, era altamente efectivo para el tratamiento de la infección genital por herpes, una forma común de enfermedad venérea causada por el virus herpes simple, morbo contra el que no se disponía de ningún método de tratamiento. Se cree que el azúcar interfiere en la síntesis de glucoproteína en el virus, en virtud de su semejanza con la manosa, un constituyente importante de las glucoproteínas víricas.

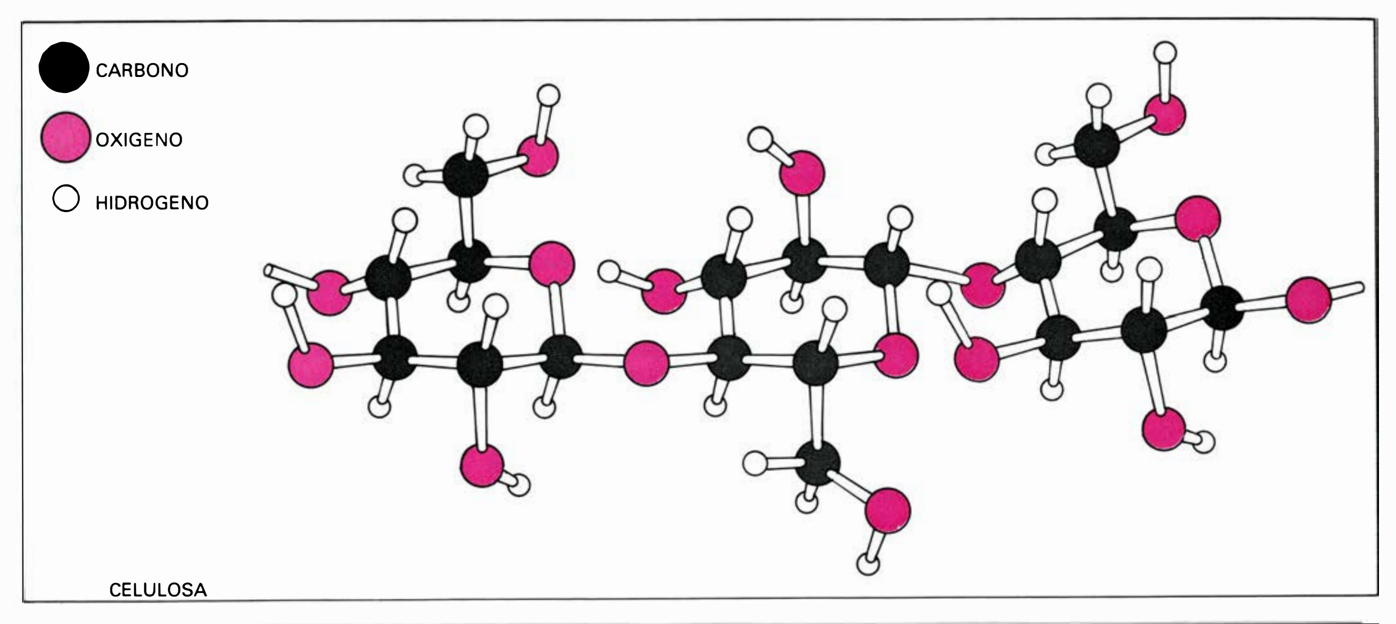
A lo largo de los últimos años se han aislado nuevos aminoazúcares y otros tipos de azúcares, a partir de antibióticos y de otras fuentes, en particular, de polisacáridos bacterianos. Uno de los más importantes es el éter 3-ácido láctico de la glucosamina, conocido por ácido murámico. Este aminoazúcar, que sólo lo presentan bacterias, fue aislado, por primera vez, por R. E. Strange y F. A. Dark en 1956, en Gran Bretaña. (Durante cierto tiempo se habló de él como del "extraño y oscuro compuesto".) Su derivado acetilado, el ácido acetilmurámico, y la acetilglucosamina forman la columna vertebral del peptidoglicano de la pared de la célula bacteriana.

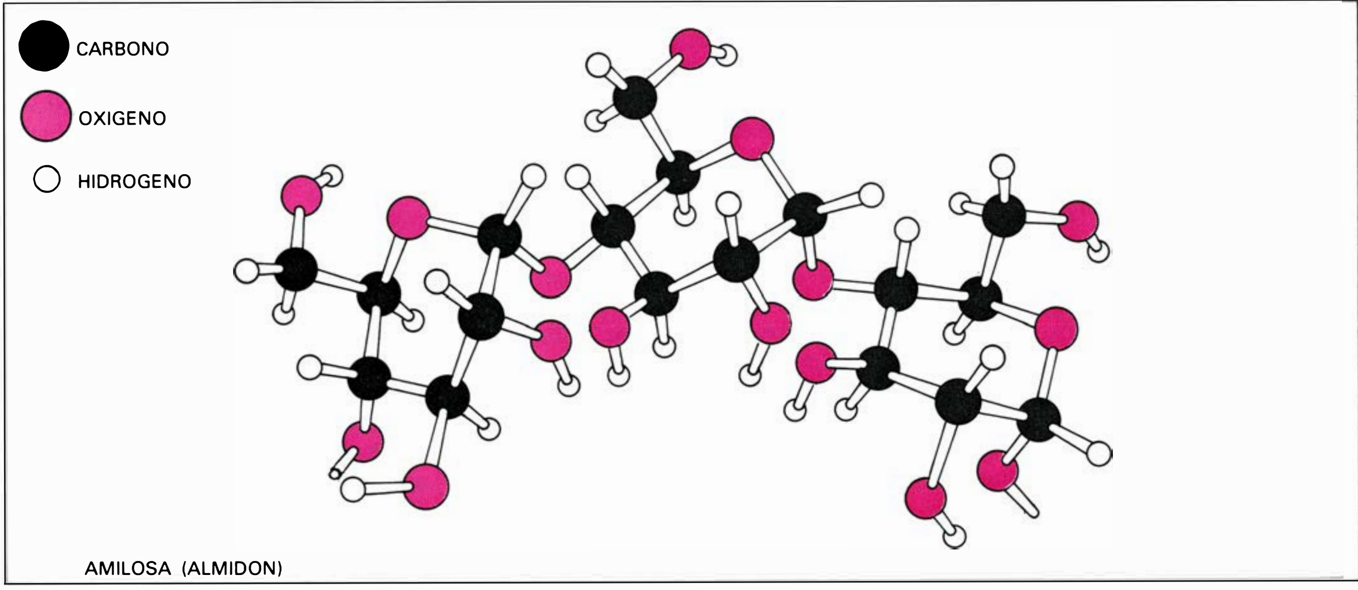
Otro nuevo azúcar es el ribitol, un producto de la reducción de la ribosa. Se trata de un constituyente de los ácidos teicoicos, descubiertos por James Baddiley en Gran Bretaña en la década de 1950. Los ácidos teicoicos son polímeros del ribitol fosfato o del glicerol fosfato, que se encuentran en bacterias gram-positivas. En la pared celular de estos organismos actúan como determinantes inmunológicos y como receptores de bacteriófagos (virus que infectan bacterias).

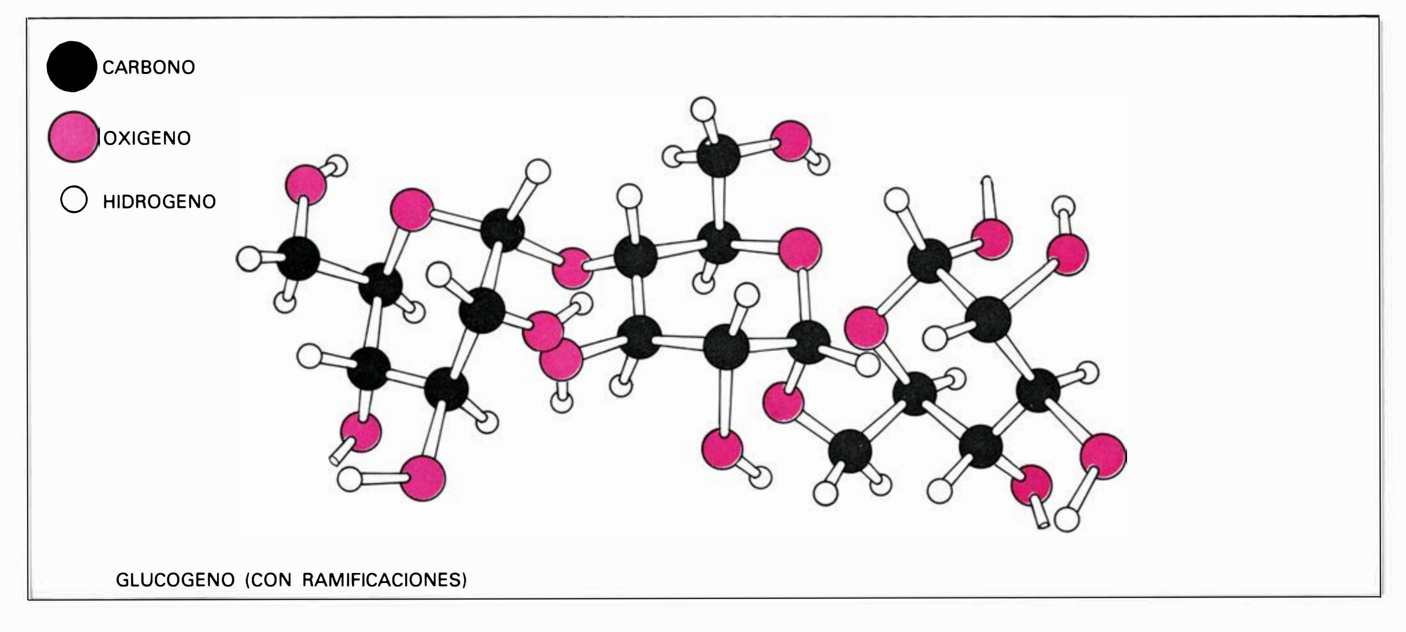
Un azúcar importante y de estructura poco común es el ácido neuramínico, compuesto del que derivan los ácidos siálicos, ubicuos en la naturaleza, salvo en las plantas. El ácido neuramínico es un azúcar ácido de nueve átomos de carbono, con un grupo amino en su molécula. Hoy se conocen 20 ácidos siálicos, la mayoría de ellos descubiertos durante la pasada década por Roland Schauer, de la Universidad de Kiel. Son los constituyentes principales de las mucinas, como las excretadas por los tractos respiratorio y urogenital; también se encuentran en el globo ocular. Su carga negativa dota a las moléculas de mucina de una estructura filamentosa. A ellos se debe la elevada viscosidad de las mucinas. Gracias a los ácidos siálicos, las mucinas pueden servir de lubricantes en la rotación del globo ocular, impidiendo que se seque la córnea y protegiéndola de las motas de polvo.

En la cavidad oral y en el tracto gastrointestinal las glicoproteínas viscosas que contienen ácidos siálicos envuelven los alimentos, haciendo que resbalen y evitando así que lesionen las superficies de las mucosas. En el canal cervical del útero, un tapón de mucina altamente viscoso impide la invasión bacteriana de la cavidad uterina y, por tanto, de la cavidad abdominal. Esta barrera viscosa remite durante la ovulación para recibir a los espermatozoides. Las glicoproteínas ricas en ácidos siálicos que segregan las glándulas mucosas de la vagina lubrifican a ésta durante el coito y el alumbramiento.

La bacilosamina es un diaminoazúcar poco común, el primero de su clase, a cuya investigación he dedicado los últimos 20 años. La descubrí en un polisacárido de *Bacillus licheniformis*, en 1958, cuando trabajaba en el laboratorio de Roger W. Jeanloz, en el Hospital General de Massachusetts. Recientemente, y en colaboración con varios investigadores, logramos establecer su estructura. Sintetizamos luego el correspondiente derivado de la galactosa, suponiendo que también aparecería en la naturaleza. Para gran satisfacción nuestra, bioquímicos de







TRES POLISACARIDOS: celulosa, almidón y glucógeno (*de arriba abajo*). Son homopolímeros, es decir, se forman por agregación de un solo tipo de monómero. En los tres polisacáridos que se muestran aquí, el monómero es la glucosa. La individualidad de estos y otros polisacáridos deriva de la longitud de la cadena polimérica (que en la celulosa alcanza varios miles de unidades), el tipo de unión entre las unidades y la existencia de ramificaciones. En la figura se muestra la unidad básica de cada uno de los tres polisacáridos. La celulosa es el componente estructural mayoritario de los vegetales. El almidón y el glucógeno constituyen, en vegetales y animales, respectivamente, los depósitos químicos donde se almacena la energía recabada de los alimentos.

Estocolmo y Tokyo identificaron en 1979 la 2,4-diamino-2,4,6-tridesoxigalactosa a partir de productos naturales.

Intermediarios de la biosíntesis

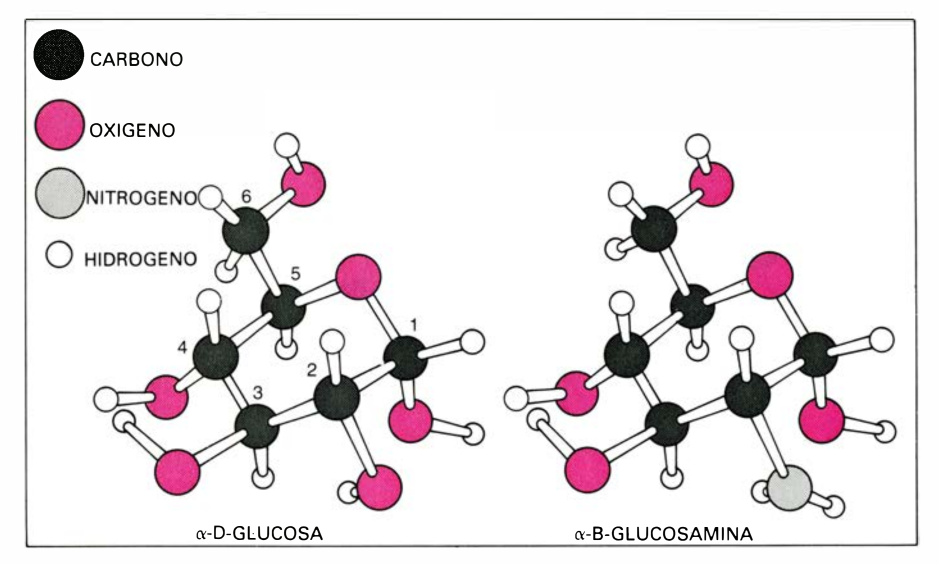
Un descubrimiento fundamental, que ha abierto nuevos horizontes a la bioquímica y ha tenido un impacto inmediato en medicina, ha sido el de los nucleótidos azucarados con sus distintas funciones de intermediarios en la biosíntesis de monosacáridos, oligosacáridos, polisacáridos y carbohidratos complejos. El primer nucleótido azucarado, la uridindifosfato glucosa (UDP-glucosa), lo descubrieron en 1949 Luis F. Leloir y sus colaboradores, en Argentina; Leloir recibió el premio Nobel en 1970 por este descubrimiento. Aproximadamente al mismo tiempo que Leloir describía la UDP-glucosa, James T. Park y Marvin J. Johnson, de la Universidad de Wisconsin, observaron la acumulación de compuestos semejantes en *Staphylococcus aureus* expuestos a penicilina.

Hasta hoy se han identificado más de 100 nucleótidos azucarados diferentes. La mayoría ofrece una estructura general de tipo nucleósido difosfato azúcar con uno de estos cinco nucleósidos: adenosina, guanosina, citidina, uridina o desoxitimidina. El azúcar muestra gran variedad de estructuras, algunas de extremada rareza.

Podemos considerar los nucleósidos como el sostén que mantiene el azúcar en una configuración fácilmente transformable en otro azúcar o adecuada para su transferencia a otro aceptor. La UDP-glucosa es el nucleótido azucarado que con mayor frecuencia se encuentra en las entidades biológicas; se trata también del compuesto de partida para la formación de distintos azúcares. En muchos organismos se convierte en UDP-galactosa, que es la fuente de galactosa para la formación de lactosa. La UDP-glucosa es también el dador de glucosa para la síntesis de glucósidos (por ejemplo, fenil-β-glucósido), oligosacáridos (como la sacarosa y la trehalosa), polisacáridos (almidón y glucógeno incluidos) y otros compuestos azucarados.

El descubrimiento de los nucleósidos azucarados no sólo condujo a la comprensión de la biosíntesis de monosacáridos poco comunes y de sacáridos complejos sino también al hallazgo por parte de Phillips W. Robbins, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Jack L. Strominger, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, en 1965, de un nuevo tipo de azúcares activados: los azúcares unidos a lípidos. Se trata de derivados de azúcares unidos por un puente monofosfato o difosfato a poliprenoles, lípidos no saturados de cadena larga. Ejemplo de este tipo de lípidos es el bactoprenol, que, en su forma de derivado difosfoazucarado, actúa de intermediario en la síntesis de los lipopolisacáridos bacterianos y del peptidoglicano.

En 1970, Leloir demostró por primera vez que unos compuestos similares, los dolicol fosfatos, participaban en la biosíntesis de glicoproteínas en células animales. En las bacterias, los intermediarios unidos a lípidos, que son hidrofóbicos (repelidos por el agua), sirven para el transporte de azúcares activados u oligosacáridos a través de la membrana lipídica, desde el citoplasma de la célula hasta la superficie celular, donde se depositan polisacáridos como el peptidoglicano. En animales no se ha establecido aún la función de estos intermediarios.

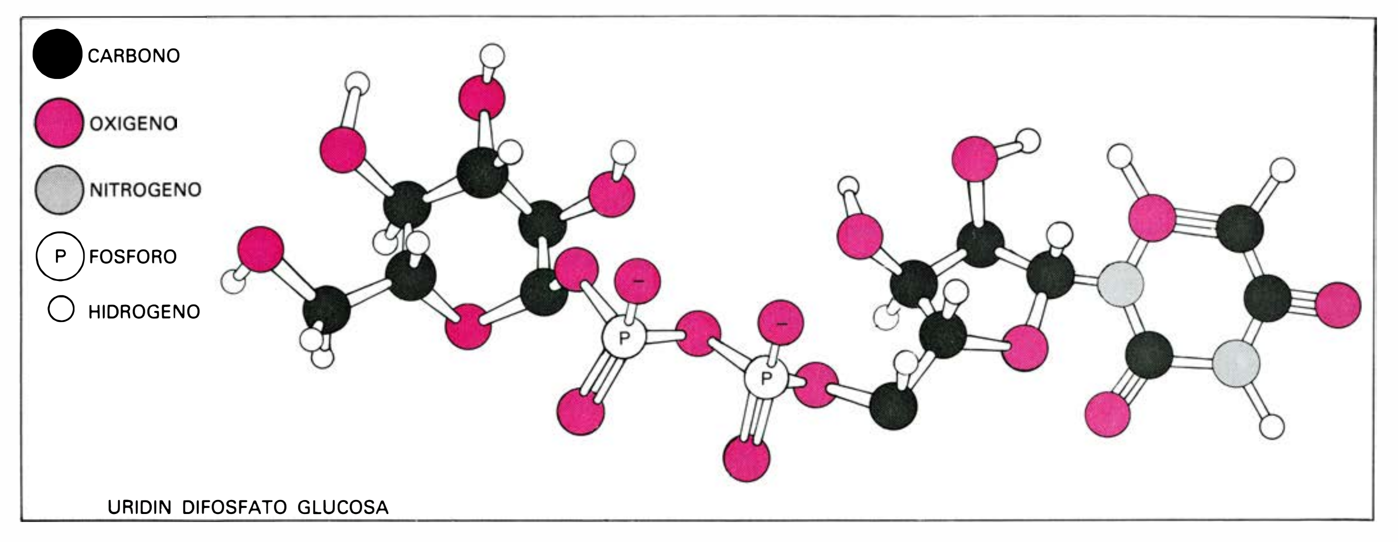


GLUCOSAMINA SE LLAMA cierto aminoazúcar que participa en la estructura del caparazón de la langosta, de la glicoproteína y de la pared celular de los hongos. En los aminoazúcares, uno o más grupos hidroxilos (−OH) de la molécula de azúcar se reemplazan por un grupo amino, u otro que contenga nitrógeno. En este caso, el grupo amino sustituye al grupo hidroxilo del carbono número 2 de la glucosa.

Fruto de las investigaciones sobre la participación de azúcares unidos a lípidos en la biosíntesis de carbohidratos complejos, se han descubierto nuevos mecanismos para el ensamblaje de polímeros biológicos. Por ejemplo, en el caso de las proteínas y los polisacáridos simples (como el glucógeno) la biosíntesis tiene lugar por adición, a la cadena creciente del polímero, de unidades monoméricas en su forma activada, mientras que en los carbohidratos complejos el mecanismo es, a menudo, diferente. En la síntesis del peptidoglicano de la pared celular se sintetiza primero un derivado peptídico del disacárido acetilglucosamina-ácido acetilmurámico sobre el transportador lipídico. Esta unidad repetitiva se polimeriza y sólo entonces se liga al aceptor polimérico. Un mecanismo similar opera en la biosíntesis de los lipopolisacáridos bacterianos, con la salvedad de que la unidad repetitiva consiste en un trisacárido de manosa, ramnosa y galactosa.

En la biosíntesis de las unidades glucídicas de las glicoproteínas unidas al aminoácido asparragina, un oligosacárido que contiene dos residuos de acetilglucosamina, nueve de manosa y tres de glucosa se ensambla a un transportador lipídico a lo largo de una compleja serie de reacciones en las que participan tanto nucleótidos azucarados como glucolípidos. El oligosacárido preformado se transfiere en bloque a determinados residuos específicos de asparragina de la cadena polipeptídica en crecimiento para su "maduración", es decir, para que alcance su forma final. Esta maduración comprende la eliminación de glucosa y la mayor parte de manosa por glicosidasas especiales, y su reemplazamiento por cadenas formadas por ácido siálico, galactosa y acetilglucosamina (como ocurre en muchas glicoproteínas séricas y en algunas víricas). El reemplazamiento tiene lugar por adición secuencial de azúcares individuales a partir de los correspondientes nucleótidos azucarados; por ejemplo, la acetilglucosamina se añade por transferencia desde UDP-acetilglucosamina, y la galactosa a partir de UDP-galactosa.

La investigación de los nucleótidos azucarados en relación con la biosíntesis del peptidoglicano de la pared celular bacteriana ha conducido a la clasifi-



UN NUCLEOTIDO DE AZUCAR, el primero del largo centenar descubierto, es la uridín difosfato glucosa (UDP-glucosa). Se trata del compuesto de partida para la síntesis de otros muchos azúcares. Su estructura general consta de un azúcar asociado a un nucleósido (adenosina, guanosina, citidina, uridina o desoxitimidina) y al fósforo en forma de grupos fosfato. En el presente caso la molécula está constituida por glucosa, uridina y dos grupos fosfato. El nucleótido mantiene el azúcar en una forma activada para su transformación en otros azúcares o para transferirlo a otros aceptores.

cación del mecanismo de acción de la penicilina, que todavía es el antibiótico más útil. La efectividad sin par de la penicilina se debe a que no se encuentra peptidoglicano en organismos distintos de las bacterias. Por tanto, es un blanco excelente para agentes quimioterapéuticos selectivos, que matan las bacterias sin afectar a sus huéspedes.

Enfermedades genéticas

Otra fuente, completamente distinta, de este renovado interés por los carbohidratos hay que buscarla en el hecho de que muchas enfermedades genéticas o hereditarias del hombre, de las que se conoce su base molecular, son defectos en el metabolismo de los carbohidratos, principalmente de los sacáridos complejos. Una de estas enfermedades es la galactosemia, un raro defecto familiar en el metabolismo de la galactosa causado por la carencia de un único enzima: la galactosa fosfatouridil transferasa. Debido a la ausencia de este enzima, los niños aquejados de esta enfermedad no pueden utilizar galactosa, o compuestos que contengan galactosa, en particular, lactosa. Estos niños se envenenan, literalmente, en el amamantamiento. La galactosa, que normalmente se convierte en glucosa y después en energía, se acumula en la sangre de estos niños en la forma tóxica de galactosa fosfato, que causa graves retrasos en el desarrollo del sistema nervioso y, con frecuencia, una muerte precoz.

Gracias al trabajo de Herman M. Kalckar y sus colaboradores, en el National Institute of Arthritis and Metabolic Disorders, de los Estados Unidos, realizado en las postrimerías del decenio de 1950, se puede diagnosticar la galactosemia antes de que la enfermedad alcance un estadio avanzado. El procedimiento analiza la presencia de enzimas que metabolizan la galactosa. Si, a falta de uno de dichos enzimas, el niño recibe una dieta libre de galactosa, desaparecen todos los síntomas de galactosemia y el desarrollo es normal.

La mayoría de los demás defectos genéticos del metabolismo de los carbohidratos provocan retraso mental y, a menudo, una muerte temprana. Los mejor descritos son las mucopolisacaridosis: trastornos del metabolismo de los mucopolisacáridos, como el síndrome de Hurler y el síndrome de Hunter, y trastornos en el metabolismo de los glicolípidos, como la enfermedad de Tay-Sachs, que tiene una incidencia relativamente alta (uno de cada 3000 nacimientos) en los judíos ashkenazi (de la Europa oriental). El enzima que falta en la mayoría de estas enfermedades se utiliza en condiciones normales para degradar sacáridos complejos.

En las mucopolisacaridosis se acumulan grandes cantidades de carbohidratos complejos (mucopolisacáridos) en los lisosomas, orgánulos subcelulares en los que normalmente se degradan las macromoléculas. A través de la orina del paciente se excretan también cantidades elevadas de mucopolisacáridos. Lo mismo ocurre con células tomadas de la piel de pacientes y sometidas a cultivo. A comienzos de la década de 1970, Elizabeth F. Neufeld, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases, descubrió que podía prevenirse esa acumulación si se suministraba a las células los enzimas degradativos de carbohidratos de los que carecían. Desgraciadamente, los intentos realizados para tratar a los pacientes administrándoles los enzimas apropiados han fracasado.

La diabetes es una enfermedad cuya estrecha relación con el metabolismo de los azúcares es muy conocida. Aunque se ha demostrado que la diabetes comprende una familia de enfermedades diferentes, todos los diabéticos tienen una cosa en común: niveles anormalmente altos de glucosa en sangre. Además, en casi todos los casos de diabetes se desarrollan complicaciones similares: enfermedades del corazón, ceguera, cataratas, daños en los vasos sanguíneos, trastornos nerviosos y lesión de los riñones. ¿Es la alta concentración de azúcar en sangre, por sí misma, la causa de las complicaciones diabéticas? Muchos investigadores piensan que así es, y que un control férreo del azúcar en sangre puede prevenir, detener y posiblemente incluso revertir la progresión de estas complicaciones.

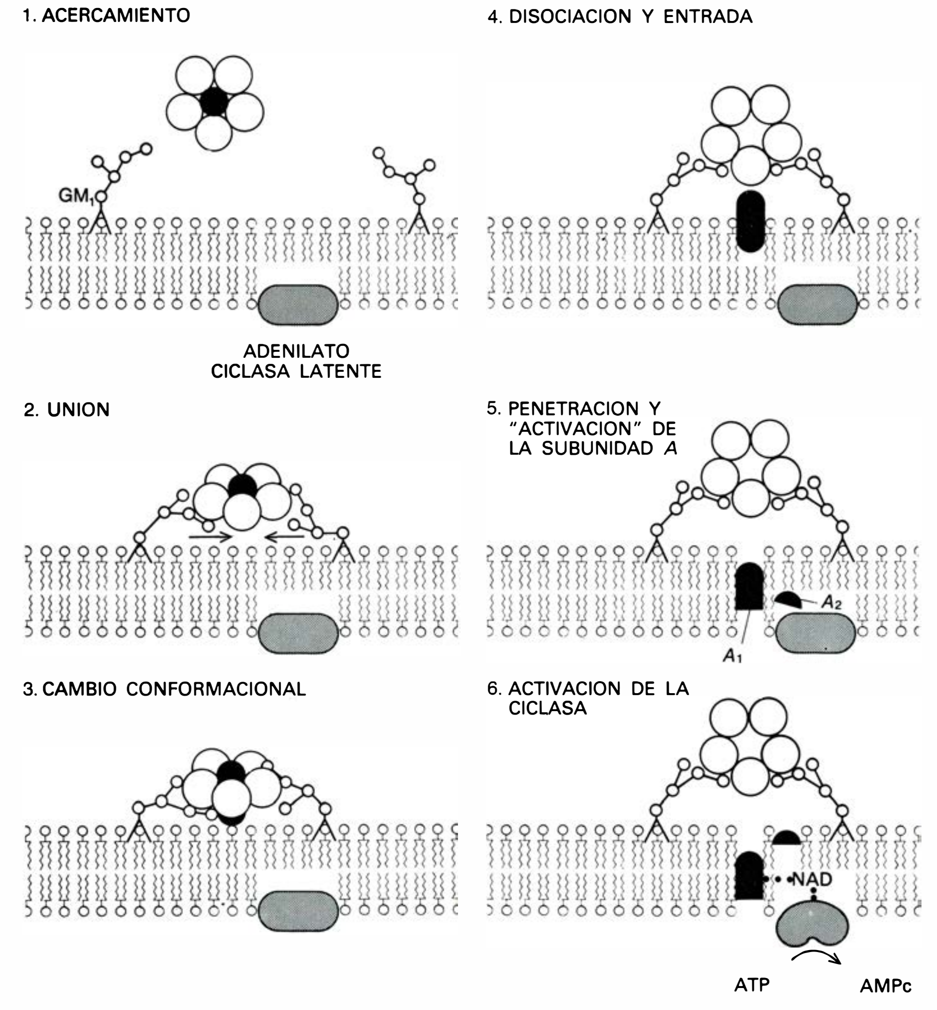
Para comprender los efectos de un nivel elevado de azúcar en sangre, los bioquímicos y los médicos se han preguntado qué lesiones celulares provoca la glucosa a nivel molecular. Un mecanismo verosímil de acción es que la glucosa se combine con proteínas corporales, alterando su configuración y su función. Recientemente, varios grupos, entre ellos los de Anthony Cerami y Ronald Koenig y sus colaboradores, de la Universidad Rockefeller, y H. Franklin Bunn, Kenneth H. Gabbay y Paul M. Gallop, de la Facultad de Medicina de Harvard, han obtenido pruebas del posible desarrollo de este proceso. Tales investigadores han descubierto que la glucosa se une por sí

misma, en un proceso que no requiere enzimas, a las moléculas de hemoglobina de los pacientes diabéticos, alterando de este modo la carga eléctrica y las propiedades bioquímicas de la hemoglobina.

La hipótesis de que la glucosa pueda combinarse con aminoácidos y proteínas no es nueva. Hubo un tiempo en que fue objeto de intensa investigación por parte de bioquímicos y químicos alimentarios. Aharon Katzir-Katchalsky estudió esta reacción en la Universidad Hebrea de Jerusalén en el transcurso de sus trabajos de doctorado, que presentó en 1938. Yo proseguí en el estudio del tema, a su lado, mientras preparaba mi propia disertación de doctorado (asimismo en la Universidad Hebrea) a lo largo del trienio de 1950 a 1953. Los agroquímicos saben, desde hace tiempo, que la interacción de la glucosa con las proteínas de los alimentos, una reacción que se conoce como "bronceamiento no enzimático", pues transcurre sin enzimas y la proteína se torna marrón, provoca una disminución de la digestibilidad y del valor nutritivo de la proteína. Los hematólogos descubrieron hace algunos años que alrededor del cinco por ciento de las moléculas de hemoglobina de los individuos sanos contenían azúcares enlazados no enzimáticamente. Esta unión de moléculas de azúcar a proteínas es un proceso lento, que no suele afectar en proporción apreciable a las proteínas que se degradan y vuelven a sintetizarse rápidamente. También es pequeña la posibilidad de que moléculas de azúcar se unan a proteínas relativamente estables, como la hemoglobina. Ahora bien, es tanta la glucosa que los diabéticos tienen en la sangre, que su nivel de moléculas de hemoglobina glucosilada duplica o triplica la cifra normal. Se está intentando sacar partido con fines clínicos a estos descubrimientos.

La vida media de glóbulos rojos y su hemoglobina oscila en torno a los 120 días. Una vez que la glucosa se ha unido a la hemoglobina, se va liberando lentamente; la cantidad de hemoglobina glucosilada, pues, en la sangre de un paciente indica la concentración total de azúcar en sangre durante las semanas precedentes. De hecho, constituye el mejor de los indicadores del control de la glucosa sanguínea del paciente durante dicho período.

Por lo mismo que la glucosa se une a la hemoglobina, con buena seguridad se unirá a otras proteínas, alterando sus propiedades y funciones biológicas. El proceso puede dañar particularmente a aquellas proteínas cuya velocidad de recambio sea pequeña; piénsese, a este respecto, en las que recubren los vasos sanguíneos y las del material aislante de las células nerviosas. Cerami acaba de demostrar que una alta concentración de glucosa conduce a la glucosilación de las proteínas del cristalino, tanto in vitro como en vivo, y a la subsecuente opacidad de la matriz proteica, que mimetiza la opacidad característica de las cataratas de los diabéticos.



ACCION DE LOS GLICOLIPIDOS en la captación de la toxina de la bacteria del cólera. Un glicolípido es un compuesto en el que un azúcar está unido a un lípido; en este caso se trata de un gangliósido, o glicolípido acídico, conocido por GM_1, que se encuentra en la membrana plasmática de las células. Una molécula de toxina del cólera, que consta de una subunidad *A* (*negra*) y cinco subunidades *B* (*blancas*), se aproxima a la membrana plasmática de una célula de la mucosa del intestino (*1*), se une al GM_1 (*2*) y, en virtud de dicha unión, cambia en su configuración (*3*), de suerte que la subunidad *A* se disocia de la toxina y se introduce en la membrana (*4*). La subunidad *A* se activa (*5*), lo que le capacita para activar a su vez el sistema celular de la adenil-ciclasa (*6*). La activación del sistema de la ciclasa conduce a la segregación, por parte de la célula, de cantidades excesivas de fluido. Ello provoca (si son muchas las células hiperactivas) grandes pérdidas de líquido que, a menudo, causan la deshidratación y la muerte por cólera. Si se administra GM_1 al paciente, de forma que en su mayor parte no se encuentre asociado a las células, el GM_1 podrá unirse a la toxina del cólera e inhibir el efecto de ésta. Ilustración de Allen Beechel.

Marcadores biológicos

Hasta hace poco, se desconocía que la naturaleza pudiera utilizar azúcares para la síntesis de compuestos altamente específicos, capaces de actuar como transportadores de información biológica. El origen de tal capacidad arranca del hecho siguiente: de un número pequeño de monómeros pueden formarse un número elevado de estructuras. En otras palabras, los monosacáridos pueden servir de letras en un vocabulario de especificidad biológica, en el que las palabras se formarían por variaciones en la naturaleza de los azúcares presentes, el tipo de enlace y la presencia o ausencia de puntos de ramificación. Es ya de dominio general que la especificidad de muchos polímeros naturales se escribe en términos de azúcares, no de aminoácidos ni de nucleótidos. Aunque no se trate de una idea absolutamente nueva, sólo recientemente ha podido ser confirmada.

En los años veinte se creía aún que el transporte de información específica en polímeros naturales era privativo de las proteínas. Entre 1925 y 1937, Oswald

T. Avery, del Instituto Rockefeller, junto con Michael Heidelberger y Walther F. Goebel demostraron que polisacáridos puros podían transportar mensajes inmunológicos específicos en forma de antígenos (sustancias que estimulan la producción de un anticuerpo específico). La "sustancia específica soluble", altamente purificada, de los neumococos de tipo III era un antígeno, aunque no tenía ninguna de las propiedades de la proteína. Se demostró que dicha sustancia era un polisacárido formado por unidades repetitivas de ácido celobiurónico (disacárido de glucosa y ácido glucurónico).

La base química de la antigenicidad de los polisacáridos se desentrañó con todo lujo de detalle a través de la aplicación de técnicas muy complejas, desarrolladas por Heidelberger y Elvin A. Kabat, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, Walter T. J. Morgan, del Lister Institute of Preventive Medicine de Londres, y muchos otros. Se sabe hoy ya con certeza que los carbohidratos son aptos para la formación de determinantes específicos. Estos determinantes pueden ser reconocidos por estructuras complementarias, presumiblemente proteínas con capacidad para unirse a carbohidratos, localizados en otras células o moléculas.

La primera indicación de que los azúcares actúan de determinantes de especificidad surgió en 1941; en ese año, George K. Hirst, en Nueva York, y Ronald Hare, en Toronto, descubrieron que el virus de la gripe instaba la aglutinación de los glóbulos rojos. Pasó tiempo sin que se desvelara la base molecular de este fenómeno. Pero, gracias sobre todo a los esfuerzos de Alfred Gottschalk, de Australia, se demostró que el virus de la gripe se unía al glóbulo rojo por medio de unidades de ácido siálico de la superficie celular. Si se eliminaba el ácido siálico de la superficie celular, con el enzima neuraminidasa, el virus de la gripe dejaba de acoplarse a la célula.

El papel de los carbohidratos en el reconocimiento se ha puesto de manifiesto particularmente en el control del tiempo de vida de las glicoproteínas en el sistema circulatorio y su capacitación por el hígado y en la ingestión de enzimas lisosómicos por las células. Como ocurre con frecuencia, tan interesantes descubrimientos surgieron de una observación imprevista, realizada en este caso en 1966 por G. Gilbert Ashwell, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases, y por Anatol G. Morell, de la Facultad de Medicina Albert Einstein, mientras se hallaban afanados por desentrañar la función biológica de la ceruloplasmina, una proteína transportadora de cobre que se encuentra en el suero sanguíneo del hombre y otros animales. Cuando Ashwell y Morell eliminaban el ácido siálico de la ceruloplasmina de conejo y volvían a inyectar en los animales la ceruloplasmina modificada, ésta desapareció casi por completo del sistema circulatorio en 15 minutos. Este hecho contrastaba fuertemente con el comportamiento de la glicoproteína nativa, que permanecía en circulación apenas alterada tras el mismo período de tiempo. Trabajos posteriores han demostrado que la eliminación de las unidades terminales de ácido siálico de muchas glicoproteínas séricas, a fin de exponer las unidades de galactosa subyacentes, provoca una rápida eliminación de las glicoproteínas modificadas del sistema circulatorio de los animales de experimentación y su captación por las células parenquimatosas del hígado. La superficie de estas células contiene un receptor específico para la unión de glicoproteínas que carecen de ácido siálico.

La galactosa, por tanto, sirve de marcador de reconocimiento, determinando el tiempo de supervivencia de muchas glicoproteínas séricas en el sistema circulatorio del hombre, el conejo y la rata. En ciertas especies de aves y reptiles, el marcador de reconocimiento parece ser principalmente la acetilglucosamina. También se han encontrado sistemas de este tipo que utilizan fucosa y manosa como marcadores.

Un marcador de especial interés es la manosa-6-fosfato; se trata de un derivado de azúcar del que se acaba de revelar que actúa principalmente dirigiendo el transporte intracelular de enzimas glicoproteicos cuya sede normal está en los lisosomas. Dicho hallazgo tuvo su origen en el descubrimiento de Neufeld de que las deficiencias enzimáticas de las células de pacientes con mucopolisacaridosis, como los síndromes de Hurler y Hunter, podían corregirse suministrando a las células los enzimas que les faltan. En 1974 demostró que su captación por las células dependía de la presencia en los enzimas de carbohidratos marcadores de reconocimiento. En 1977, William S. Sly, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, y Arnold Kaplan, de la de Saint Louis, identificaron el marcador de reconocimiento como una unidad fosforilada de azúcar: la manosa-6-fosfato. Según se desprende, el marcador tiene por misión impedir la secreción de enzimas por las células y la de dirigirlos al interior de los lisosomas. Cuando se suministran los enzimas desde el exterior, esta señal de reconocimiento es la que promueve su unión a la superficie celular; sin esta unión, no pueden entrar en las células y alcanzar los lisosomas.

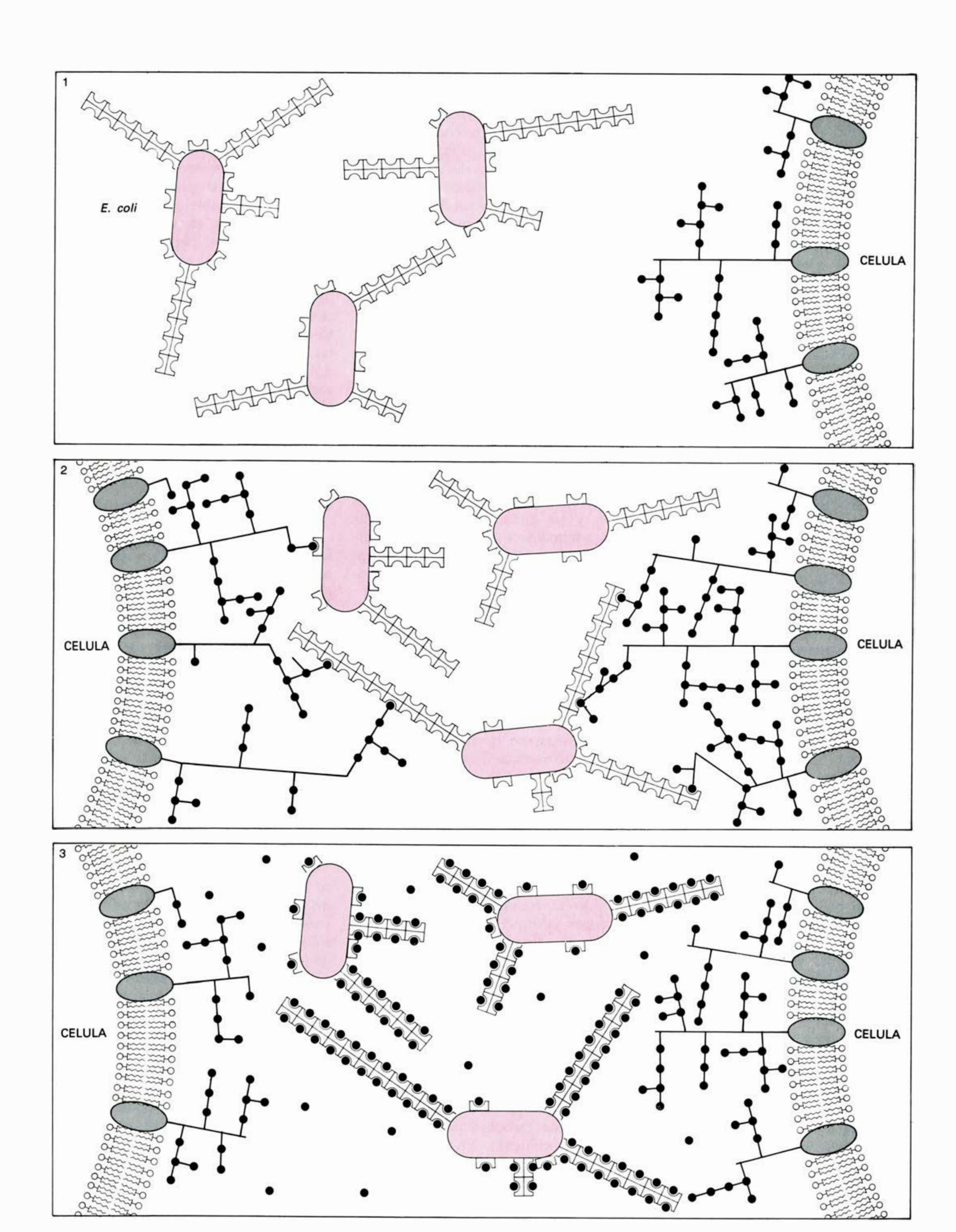
Quizá sea posible controlar la vida de las proteínas en la circulación y dirigirlas hacia el hígado y, tal vez, hasta otros órganos incluso, sin olvidar los lisosomas, uniendo carbohidratos a dichas proteínas por medio de un enlace covalente (con compartición de electrones) o modificando los azúcares de las glicoproteínas. Estas técnicas tendrán una gran aplicación en terapias de reemplazamiento de enzimas en el tratamiento de enfermedades genéticas, así como para dirigir con precisión determinadas drogas hacia órganos o células objetivo.

Otras funciones biológicas

Los azúcares de las superficies celulares determinan también, según parece, la duración de la vida de las células circulantes y su distribución por el cuerpo. Esta función la demostraron por primera vez, en 1964, Bertram M. Gesner y Victor Ginsburg, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases. Observaron que, al inyectar en ratas linfocitos marcados radiactivamente, éstos migraban al bazo. Si se eliminaba, antes de la inyección, el azúcar fucosa de la superficie de las células por tratamiento con una glicosidasa específica, los linfocitos migraban hacia el hígado; se diría que la fucosa codificara las señas de destino de los linfocitos.

Los glóbulos rojos viejos tienen en su superficie menos ácido siálico que los jóvenes; en virtud de lo cual se ha postulado que la disminución de ácido siálico constituye la señal responsable de la eliminación de los glóbulos rojos viejos del sistema circulatorio. Esta hipótesis se apoya en el descubrimiento de que, cuando se extraen glóbulos rojos de la corriente sanguínea, se elimina el ácido siálico de sus superficies y vuelven a inyectarse en sangre, la duración de su vida es extremadamente corta: sólo dos días, cuando lo usual es que sobrevivan 120. A pesar de estas notables correlaciones, sigue dudándose de que la eliminación del ácido siálico y la exposición de unidades de galactosa en la superficie de los glóbulos rojos sean las responsables de la eliminación de los glóbulos rojos viejos de la sangre en condiciones fisiológicas in vivo.

El conocido sistema de grupos san-



MECANISMO DE UNION de *E. coli* a la membrana celular, como se aprecia en la micrografía que encabeza las ilustraciones de este artículo, y su inhibición por manosa libre. Las bacterias se aproximan a una membrana celular (*1*), donde se encuentra embebida una glicoproteína. En este caso, la manosa (*puntos negros*), que forma parte de la glicoproteína, es reconocida por los sitios de unión de *E. coli*. La bacteria se adhiere a la superficie del huésped (*2*), iniciando la infección. Si hay manosa libre disponible, ésta se une previamente a la bacteria (*3*) e impedirá de este modo la unión a la célula.

guíneos *ABO* fue descrito por primera vez por Karl Landsteiner, del Instituto Rockefeller, en 1900. Hubo de transcurrir, empero, más de medio siglo hasta que, en 1953, Walter Morgan y Winifred Watkins, del Instituto Lister, demostraran que la especificidad de los principales tipos de sangre estaba determinada por azúcares. Así, la diferencia entre los grupos sanguíneos *A* y *B* reside en una sola unidad de azúcar que sobresale del extremo de una cadena de carbohidrato de una glicoproteína o un glicolípido ubicado en la superficie del glóbulo rojo. En la sangre del tipo *A,* el determinante es la acetilgalactosamina, mientras que en la sangre del tipo *B* lo es la galactosa. Aunque ambos monosacáridos varían tan sólo en un pequeño grupo de átomos, esta pequeña diferencia es, a veces, una cuestión de vida o muerte, pues utilizar un tipo de sangre equivocado en una transfusión puede tener resultados fatales.

La eliminación enzimática de la acetilgalactosamina unida en α de los glóbulos rojos del tipo *A* o de la galactosa unida en α de los glóbulos rojos del tipo *B,* por medio de glicosidasas específicas, convierte a ambas en células del tipo *O.* Se puede llevar a cabo una conversión efectiva utilizando, por ejemplo, α-galactosidasa purificada de granos de café o de soja, como lo demostraron en nuestro laboratorio Noam Harpaz y Harold Flowers. Este tipo de conversión puede ser clínicamente útil cuando se necesitan subtipos raros de células del tipo *O* para transfusiones.

Los azúcares que determinan la especificidad de los grupos sanguíneos *ABO* se encuentran distribuidos en la biosfera de forma similar a la observada en los seres humanos. Por tanto, estas sustancias se hallan también en distintos mamíferos. Así, los glóbulos rojos del perro, el cerdo y el conejo corresponden invariablemente al tipo *B* y, en algunos casos, pueden pertenecer también al tipo *A.* Las sustancias de los grupos sanguíneos *ABO* se encuentran en aves y anfibios e incluso en plantas y bacterias.

Tamio Yamakawa, de la Universidad de Tokyo, ha sugerido recientemente que los perros podrían tener un sistema de grupos sanguíneos especificado por el ácido siálico contenido en los glicolípidos de los glóbulos rojos. A diferencia de los perros europeos examinados hasta ahora, cuyos glicolípidos incorporan ácido acetilneuramínico, Yamakawa y sus colaboradores han demostrado que canes japoneses, pertenecientes a las razas kishu y shiba, suelen portar ácido glicolilneuramínico, cuya presencia está determinada genéticamente. Las razas akita y hokkaido, del Japón septentrional, parecen ser una excepción por cuanto sólo tienen ácido acetilneuramínico en los glicolípidos de sus glóbulos rojos. Sigue debatiéndose en torno al origen de los perros japoneses; ahora bien, puesto que el glicolípido que contiene ácido glicolilneuramínico se hereda como carácter dominante, estos hallazgos sugieren que el origen de las razas akita y hokkaido difiere del ancestro de otros perros japoneses, y que las razas akita y hokkaido están relacionadas con los perros europeos.

Se sabe hoy que varias toxinas bacterianas vegetales reconocen estructuras de carbohidratos que portan distintas clases de moléculas de la superficie celular. Entre ellas, la toxina del cólera y, posiblemente, la del tétanos, que se unen a determinados glicolípidos de tipo glangliósido. Los glangliósidos son glicolípidos acídicos que se concentran selectivamente en la membrana plasmática de las células.

En 1971, W. E. van Heyningen, de la Universidad de Oxford, demostró que ciertos gangliósidos del cerebro se unían a la toxina del cólera y bloqueaban su efecto fisiológico. Trabajos posteriores realizados por van Heyningen, por Lars Svennerholm y Jam Holmgren, de la Universidad de Göteborg, y por Pedro Cuatrecasas, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, mostraron que el inhibidor más efectivo era el gangliósido GM_1. Se observó una estrecha correlación entre el contenido en GM_1 de las células de la mucosa intestinal de diferentes especies y la cantidad de toxina del cólera que se unía a ellas. Existen también pruebas fundadas de que determinados gangliósidos pueden inhibir la acción de las toxinas del tétanos y del botulismo. La presencia en las células de carbohidratos específicos que muestran una fuerte afinidad por las toxinas de organismos virulentos, como las del cólera y la difteria, es de gran importancia médica, pues quizá se consiga algún día proteger al organismo frente a estas enfermedades mediante la administración de los gangliósidos adecuados.

Los azúcares de los gangliósidos de la superficie celular sirven para la unión de otras moléculas biológicamente activas. Entre ellas merece destacarse el potente agente antivírico conocido por interferón. La incubación de gangliósidos con interferón inhibe la actividad antivírica de éste. Es más, las células de ratón que no responden al

tratamiento con interferón lo hacen tras la incorporación de gangliósidos en la superficie de sus membranas. Estos resultados indican que los gangliósidos y el interferón interaccionan en la superficie celular y que tales carbohidratos complejos podrían intervenir de alguna manera en la actividad antivírica del interferón.

Reconocimiento celular

Los azúcares de la superficie celular sirven de receptores de varios agentes fisiológicos y no fisiológicos. Entre ellos cabe citar las lectinas, que, al unirse a las células, provocan a menudo la aglutinación. Si se unen a linfocitos, inducen el crecimiento celular y la división, fenómeno que se conoce por estimulación mitogénica.

Se observan notables cambios en los azúcares de la superficie celular durante el desarrollo y diferenciación de las células y a lo largo de la transformación de células normales en malignas. Muchos cambios de éstos se detectaron en un comienzo con ayuda de las lectinas. En particular, durante los años 60, al descubrirse que las lectinas (como la aglutinina del germen de trigo, la concanavalina A y la aglutinina de soja) aglutinaban con más facilidad células malignas que células normales, se centró la atención de muchos investigadores sobre los azúcares de la superficie celular. No obstante, se está perdiendo el interés por estos descubrimientos, pues cuesta muchísimo identificar los cambios estructurales que acontecen en la superficie cuando las células normales se tornan malignas. Tampoco se ha llegado a la razón fisiológica de dichos cambios. Por si ello no bastara, el aumento de la aglutinación por lectinas no es propiedad que compartan todas las células malignas; de ahí que las primeras expectativas sobre el empleo de lectinas para definir, y, tal vez, atacar dichas células selectivamente se hayan visto defraudadas.

Los azúcares de la superficie celular participan en la fecundación de mamíferos, erizos de mar, protozoos y algas. La asociación celular en los hongos mucilaginosos está mediada por la interacción entre proteínas unidas a carbohidratos de una célula y receptores formados por oligosacáridos específicos de otra. De este modo, la diferenciación de los hongos mucilaginosos desde una forma vegetativa (unicelular) hasta la forma cohesiva (agregada) va acompañada de la aparición de lectinas y glicoproteínas específicas en muchas superficies celulares. Además, azúcares simples, como la galactosa y la acetilgalactosamina, inhiben la agregación celular en el sistema citado.

Durante los últimos años se ha comprobado que los azúcares de la superficie celular actúan de receptores de virus y bacterias. Este hallazgo es, probablemente, el ejemplo mejor documentado de una interacción específica célula-célula mediada por carbohidratos. Nos hallamos ante un fenómeno del mayor interés, por cuanto la adherencia de la bacterias a la superficie de los tejidos constituye el primer paso de la infección bacteriana. Los estudios realizados en nuestro laboratorio, y en otros lugares, han demostrado que bacterias como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* se adhieren a las células epiteliales y a los glóbulos blancos a través de unidades de manosa de la superficie de dichas células. Esta interacción está mediada por una lectina específica para manosa localizada en la superficie de las bacterias. Yuval Eshdat, de nuestro departamento, ha aislado la lectina de *E. coli*. También hemos encontrado, en colaboración con David Mirelman, de nuestro departamento, y Moshe Aronson y Itzhak Ofek, de la Universidad de Tel Aviv, que la colonización del tracto urinario de ratas infectadas por *E. coli* puede disminuir de manera ostensible por administración de metil-α-manósido, un azúcar que inhibe con eficacia la adherencia manoso-específica de las bacterias a las células epiteliales. Nuevas investigaciones en torno a los azúcares de la superficie celular que actúan de receptor de bacterias habrán de conducir al diseño de mejores inhibidores de la adherencia. Tales inhibidores podrían impedir las infecciones bacterianas bloqueando el primer paso, esto es, evitando la adherencia del organismo invasor a las superficies epiteliales del huésped.

En resumen, se ha descubierto una gran variedad de carbohidratos, muchos de ellos extremadamente complejos. Los carbohidratos desempeñan múltiples funciones en los organismos vivos; una de las más importantes, como sucede con los ácidos nucleicos y las proteínas, es que parecen transmitir información. El estudio de estos compuestos y la caracterización pormenorizada de su estructura química y su conformación no sólo conducirán a una comprensión más adecuada de lo que es la vida, sino que también permitirán combatir con mayor fuerza ciertas enfermedades, como las causadas por defectos genéticos o agentes infecciosos.

El aparato vestibular

El mantenimiento del equilibrio y la orientación depende de dos órganos del oído interno: los canales semicirculares y los receptores otolíticos. El sistema es "multimodal", pues utiliza también información procedente de otros sentidos

Donald E. Parker

Si dejamos caer un gato panza arriba, aterrizará sobre sus cuatro patas en posición normal. Al inclinar hacia atrás un recién nacido, sus ojos bajarán la mirada, manteniéndose la vista al frente. Si el lector mueve rápidamente la cabeza de un lado para otro mientras lee este artículo, la letra impresa permanecerá inmóvil. Cada uno de estos fenómenos supone la compensación de una alteración del equilibrio o la orientación y depende del control que sobre estos parámetros ejerce el aparato sensorial del vestíbulo en el oído interno.

La función del aparato vestibular se conoce sólo en parte. A diferencia de otros sentidos, en los que existen sensaciones subjetivas como el ver u oír, el aparato vestibular responde a aceleraciones de la cabeza, pero no se acompaña de ninguna sensación subjetiva. El estudio de las funciones vestibulares resulta difícil, pues el aparato vestibular no es sino una de las fuentes de información que utiliza el sistema de mantenimiento del equilibrio y orientación. Este sistema es "multimodal", es decir, recibe también información procedente del sentido de la vista y de receptores somáticos (situados en la piel y en las articulaciones). Por otra parte, el sistema multimodal de mantenimiento del equilibrio y orientación es capaz de adaptarse: si el aparato vestibular resulta dañado, el sistema puede seguir funcionando sin él. Por todas estas razones resulta difícil trazar el curso de una respuesta que parta de un receptor determinado incluido en esta tríada de receptores: vestibulares, visuales y somáticos.

Los experimentos que se realizarán en el satélite tripulado Spacelab permitirán determinar la capacidad de los astronautas para mantener el equilibrio y la orientación en condiciones de ingravidez y, en consecuencia, ofrecerán una nueva oportunidad para estudiar el evasivo aparato vestibular. Tales experimentos pueden contribuir también a esclarecer la relación entre el mareo y el funcionamiento del aparato vestibular.

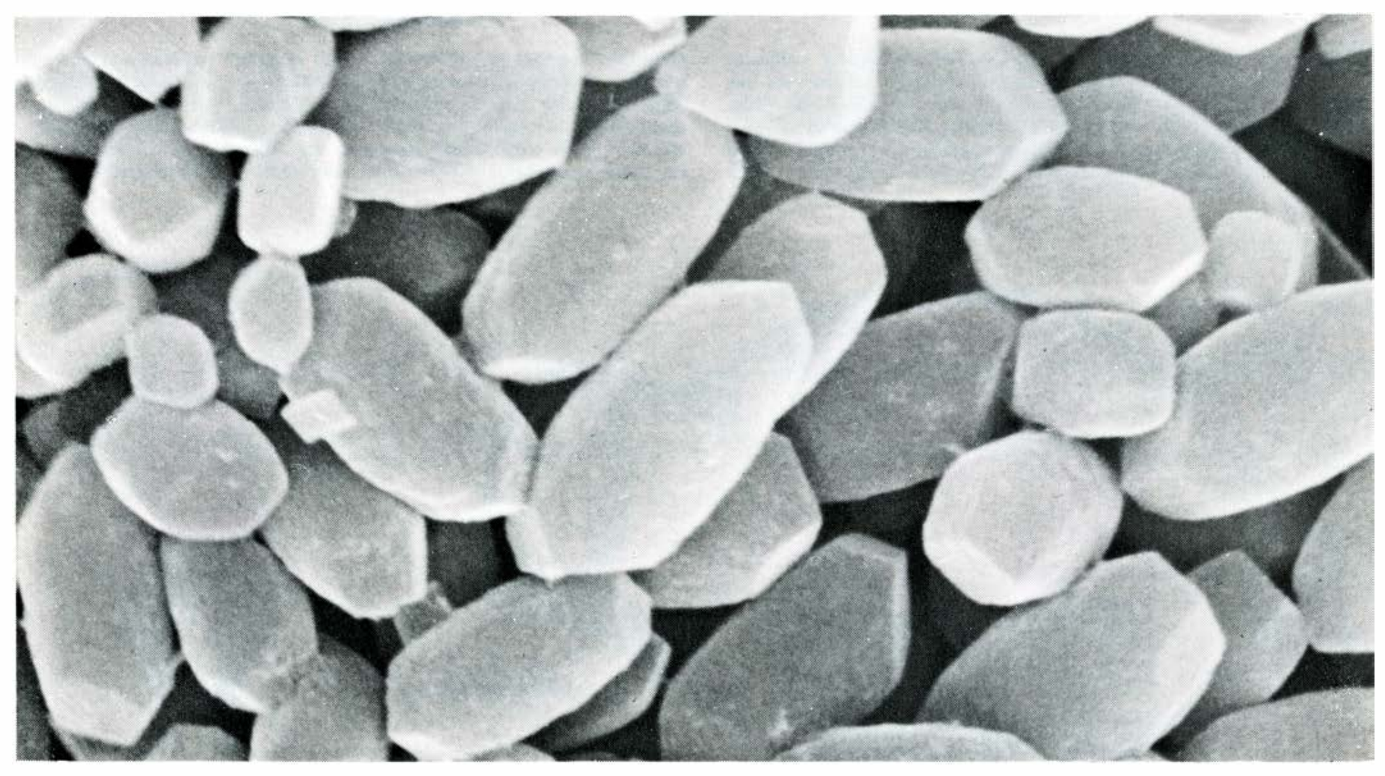
Los animales vertebrados, desde los peces y anfibios hasta las aves y el hombre, poseen aparato vestibular. En el centro del aparato se encuentran los receptores vestibulares del oído interno. Cuando la cabeza experimenta aceleración en una dirección determinada, en el interior del receptor un fluido o una masa gelatinosa recubierta con cristales diminutos tiende a permanecer estacionaria en relación al suelo. Proyectándose en el fluido o en la masa gelatinosa se encuentran los cilios, filamentos muy finos anclados en el resto de la cabeza. Cuando se desplaza la cabeza, los cilios se flexionan en sentido opuesto, igual que las cerdas de un cepillo se inclinan hacia atrás cuando el cepillo se desplaza sobre una superficie. La flexión da lugar a impulsos en las células nerviosas adyacentes, impulsos que se transmiten al cerebro. En respuesta a tales estímulos se ponen en marcha reflejos que determinan movimientos del ojo, cuello, extremidades y músculos corporales, y se activan células nerviosas que intervienen en la percepción del movimiento y de la orientación espacial.

Los receptores vestibulares están situados en el laberinto membranoso del oído interno, una serie de tubos y sacos llenos de líquido suspendidos en el intrincado espacio del hueso temporal denominado laberinto óseo. Existen dos clases de receptores: los órganos otolíticos (o estatolíticos), que responden a aceleraciones lineales, y los canales semicirculares, que responden a aceleraciones angulares. Las aceleraciones lineales incluyen la acción de la gravedad y se definen como un cambio en la velocidad de un objeto que se desplaza en línea recta. (La atracción de la gravedad es equivalente a acelerar un objeto hacia arriba a 980 centímetros por segundo al cuadrado.) La aceleración angular en un movimiento circular se mide por el cambio en la velocidad de rotación y se expresa frecuentemente en grados por segundo al cuadrado.

Los órganos otolíticos son dos estructuras similares en forma de saco situadas en el oído y denominadas utrículo y sáculo. Cada órgano contiene una serie de células ciliadas que constituyen la mácula. En el utrículo, la mácula se encuentra en un plano aproximadamente horizontal cuando la cabeza se encuentra en posición vertical, mientras que en el sáculo su posición es aproximadamente vertical. En el utrículo, los cilios se proyectan hacia arriba en la membrana gelatinosa del otolito, mientras que en el sáculo se proyectan lateralmente. Laxamente unidas a la superficie de la membrana se encuentran las otoconia, cristales de carbonato cálcico cuya densidad, de 2,95 gramos por centímetro cúbico, es casi tres veces la densidad del agua. Los cristales actúan como una masa provista de inercia que resiste con vigor la aplicación de fuerzas externas. Cuando la cabeza se desplaza en respuesta a una aceleración lineal, los cristales del utrículo o del sáculo permanecen inmóviles al flexionarse hacia atrás los cilios situados debajo de la membrana gelatinosa. Por ejemplo, cuando se deja caer un gato, los receptores del sáculo detectan un cambio en la aceleración en el momento en que el animal inicia la caída y transmiten señales que determinarán la extensión de los músculos de las extremidades inferiores para preparar el aterrizaje. En los dos órganos otolíticos, la flexión de los cilios desencadena los impulsos nerviosos que transmiten la información al cerebro.

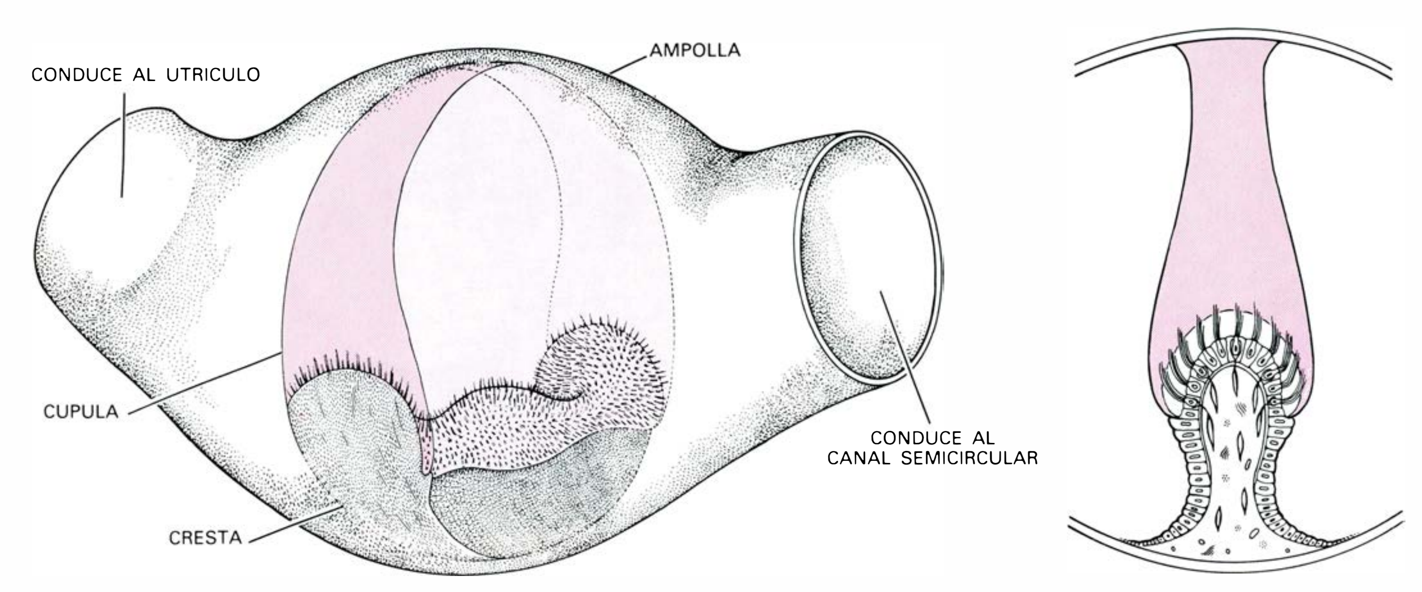


FILAMENTOS MUY FINOS recubren la superficie del receptor otolítico en el vestíbulo del oído interno. Los filamentos responden a aceleraciones lineales de la cabeza. Esta micrografía electrónica de barrido, con una ampliación de 5000 diámetros, muestra la superficie del órgano utricular, uno de los dos receptores otolíticos de cada oído. Cada haz de filamentos consta de una serie de filamentos pequeños, los estereocilios, y uno más largo, el quinocilio. La función de este último no se conoce muy bien. Los filamentos se proyectan hacia arriba, en el utrículo, y lateralmente en el sáculo, penetrando en una membrana gelatinosa que se ha eliminado para obtener la micrografía. Alrededor de los filamentos se aprecian los restos de una superficie esponjosa, la base filamentosa, en que se apoya la membrana gelatinosa. La micrografía, que fue obtenida por Dean E. Hillman, del Centro Médico de la Universidad de Nueva York, muestra el utrículo del oído interno de una rana; el utrículo humano es similar en morfología y función.

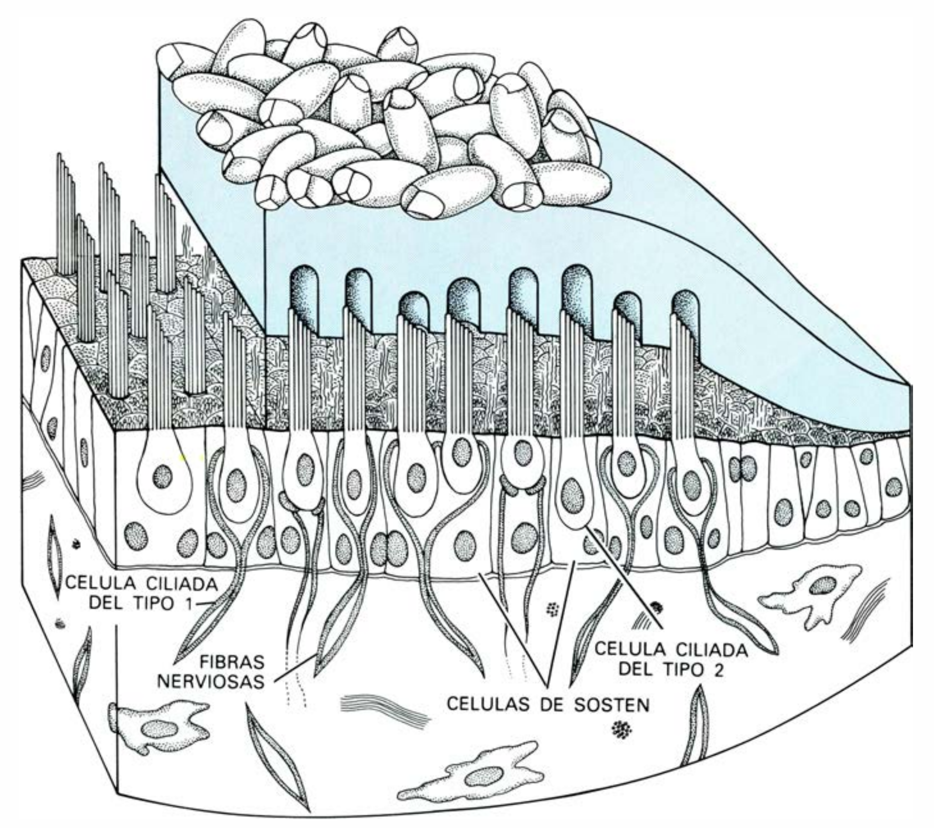


LOS CRISTALES DENOMINADOS OTOCONIA funcionan como una masa dotada de inercia en los receptores otolíticos. Los densos cristales, de carbonato cálcico, descansan sobre una membrana gelatinosa que no se aprecia en esta micrografía electrónica de barrido del utrículo humano; los cristales se han ampliado unas 5000 veces. Una aceleración lineal de la cabeza desplaza a los filamentos incrustados en la superficie de los receptores otolíticos; los cristales otoconia resisten la aceleración y mantienen la membrana gelatinosa estacionaria. En consecuencia, los filamentos que se proyectan en la membrana y que parten de la superficie de los otolitos se inclinan en sentido opuesto a la aceleración. Las células nerviosas situadas en la base de los filamentos transmiten la información al sistema nervioso central. La micrografía electrónica de barrido se debe a Muriel D. Ross.

APARATO VESTIBULAR, formado por una serie de sacos y conductos llenos de líquido. En este esquema del aparato vestibular humano, los tres canales semicirculares están situados a la izquierda; en sentido de las agujas del reloj, empezando por arriba, se encuentran sucesivamente el canal superior, el horizontal y el posterior. Están orientados en las tres dimensiones del espacio y responden a las aceleraciones angulares de la cabeza. En el centro del esquema se encuentran los dos receptores otolíticos: el utrículo (*arriba*) y el sáculo. El aparato vestibular está lleno de un fluido denominado endolinfa; en los canales semicirculares, la endolinfa se comporta como una masa dotada de inercia, con función análoga a los cristales de los receptores otolíticos. Cada canal semicircular posee una dilatación, la ampolla, una de las cuales se muestra en color; está aumentada en la ilustración inferior.



DILATACION DEL CANAL SEMICIRCULAR, la ampolla, representada como si fuera transparente para observarla en su totalidad (*izquierda*) y en sección transversal (*derecha*). Los filamentos anclados en una superficie en forma de cresta, la crista, se proyectan en una masa gelatinosa denominada cúpula (*color*). La endolinfa fluye a través del canal pero queda bloqueada por la cúpula. Cuando la cabeza sufre una aceleración en el plano del canal, el fluido permanece estacionario mientras el canal, incluyendo la masa gelatinosa, se desplaza junto con la cabeza. La cúpula y los filamentos que se proyectan en ella se inclinan en la dirección opuesta. La flexión de los filamentos estimula la transmisión de impulsos por las células nerviosas.



RECEPTOR OTOLITICO. Se aprecian los haces de filamentos que se proyectan en la membrana gelatinosa (*color*). El quinocilio, el filamento más largo de cada haz, se fija lateralmente en una apertura de la membrana; los estereocilios, más cortos, se proyectan en la apertura sin establecer contacto. Los cristales denominados otoconia descansan en la superficie de la membrana y ésta a su vez lo hace en una superficie esponjosa, denominada base filamentosa. Subyacente a ésta, hallamos una capa de células. Cerca de la superficie de esta capa se encuentran las células ciliadas; separando estas células y proyectándose hacia la parte inferior de la capa se instalan las células de soporte. Unidas a las células ciliadas se observan fibras nerviosas filiformes que transmiten impulsos al sistema nervioso central. La curvatura de la capa inferior del tejido corresponde a la pared interior del utrículo y el sáculo.

Los tres canales semicirculares, los órganos que detectan la aceleración angular, se encuentran situados en tres planos, tales como los definidos por los ejes x, y y z de una gráfica tridimensional. Dependiendo del plano de rotación de la cabeza, resultarán afectados un canal, dos canales o los tres. Cada canal posee una dilatación, la ampolla, que contiene una serie de células ciliadas e incrustadas en una superficie que, por su forma, recibe el nombre de cresta. Al igual que en los órganos otolíticos, los cilios se proyectan en una membrana gelatinosa denominada cúpula. Si en los órganos otolíticos los cristales otocónicos proporcionaban la masa inercial, en los canales semicirculares desempeña el mismo papel un fluido, la endolinfa. Cuando la cabeza gira, el líquido tiende a permanecer en reposo, y la cúpula, junto con los cilios que se proyectan en ella, se desplaza en dirección opuesta.

El movimiento de los cilios, tanto en los órganos otolíticos como en los canales semicirculares, desencadena impulsos nerviosos a través de la alteración del potencial eléctrico de las células nerviosas adyacentes. Cada una de estas neuronas, al igual que otras células nerviosas, posee un axón, una larga fibra en la que se aprecia una diferencia de carga eléctrica entre la parte interna, negativa, y la externa, positiva. Esta diferencia de carga es lo que se conoce como potencial de membrana, que en una neurona en reposo es de unos 70 milivolt. La mayoría de las neuronas vestibulares emiten un tren continuo de impulsos.

Cuando los cilios vestibulares se desplazan en una dirección determinada, aumentan la negatividad del interior del axón de las neuronas vecinas, lo que equivale a incrementar su potencial. Se dice entonces que las neuronas están hiperpolarizadas; y emiten impulsos a intervalos más distanciados. Si los cilios se desplazan en sentido opuesto, el interior de los axones se hace menos negativo, es decir, las neuronas se despolarizan y transmiten impulsos a un ritmo mayor.

Varios investigadores, especialmente César Fernández y Jay M. Goldberg, de la Universidad de Chicago, han caracterizado un segundo tipo de neuronas en el sistema vestibular. Tales neuronas responden, más que al desplazamiento de los cilios, a los cambios que experimenta dicho movimiento. Después de un período de flexión sostenida (aceleración constante) dejan de transmitir impulsos regulares. Estas neuronas pueden informar al cerebro de que ha ocurrido un cambio e indicar la velocidad de dicho cambio.

Las vías nerviosas que conectan el aparato vestibular con el cerebro y la médula espinal son complejas y no se conocen tan bien como las de otros sistemas sensoriales. Se sabe, no obstante, que todos los impulsos procedentes del aparato vestibular se dirigen inicialmente a uno de los dos destinos siguientes: el tronco cerebral, exactamente por encima de la médula espinal, y el cerebelo, en la parte posterior del cerebro.

Las fibras del nervio vestibular que alcanzan el tronco cerebral terminan en uno de los cuatro centros nerviosos (grupos de neuronas) denominados núcleos vestibulares: el superior, el de Deiters (o lateral), el medio y el descendente (o inferior). Estos grupos celulares reciben también información de receptores visuales y somáticos, especialmente de los receptores de los músculos del cuello, que informan sobre el ángulo de inclinación de la cabeza. Esta información se coordina en los núcleos vestibulares, de donde parten impulsos que alcanzan los músculos oculares o la médula espinal, determinando la contracción refleja del cuello, extremidades o músculos corporales. Desde el receptor hasta la médula espinal pueden existir muchas neuronas o estar implicadas únicamente dos. En este último caso, un axón se extiende del receptor a los núcleos vestibulares y otro desde estos núcleos hasta la médula espinal, con una longitud de 30 centímetros o más.

En el cerebelo, los impulsos nerviosos originados en receptores visuales y somáticos alcanzan una región denominada cerebelovestibular. La formación reticular, un conjunto de células del tronco cerebral, recibe también información de los receptores visuales y somáticos (pero no de los vestibulares) y establece conexión con los núcleos vestibulares en otra región del tronco cerebral. Está por determinar cuál sea la función precisa del cerebelo y de la

formación reticular en el mantenimiento del equilibrio y la orientación.

Puesto que los sistemas que reciben información de los receptores vestibulares son multimodales, recibiendo además información de receptores visuales y somáticos, resulta difícil aislar un impulso nervioso exclusivamente vestibular. Dos de las demostraciones más simples y menos equívocas de impulsos vestibulares están relacionadas con el sistema "funcional" que actúa estabilizando los ojos. Los sistemas funcionales pueden exigir la intervención de distintos órganos sensoriales y vías del sistema nervioso central en la compensación de las alteraciones del equilibrio o la orientación visual. Tales alteraciones pueden estar causadas por el medio ambiente, como ocurre cuando una fuerza externa desplaza la cabeza o los ojos, o pueden iniciarse en el propio organismo, como ocurre en los movimientos voluntarios de la cabeza o los ojos.

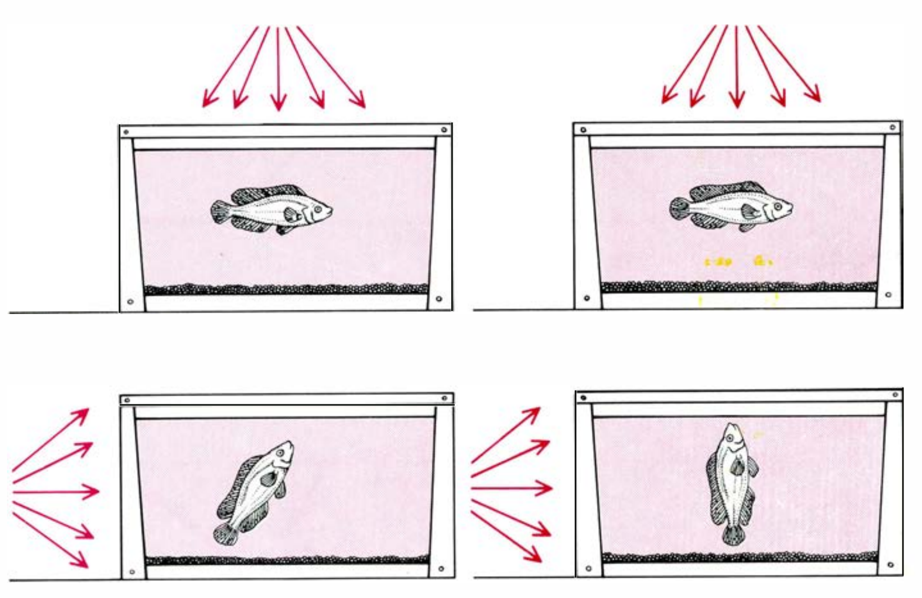
Consideremos la siguiente demostración, basada en una alteración voluntaria. Coloquemos la palma de la mano a unos 30 centímetros de la cara fijando en ella la mirada. Si el sistema vestibular funciona normalmente, al girar la cabeza a uno y otro lado unas tres veces por segundo, las rayas de la mano se apreciarán nítidamente, prueba de que los canales semicirculares han mandado impulsos a los músculos oculomotores determinando la rotación de los ojos en sentido opuesto al de la rotación de la cabeza. Si es la cabeza la que permanece fija y se agita la mano a un lado y a otro con la misma velocidad, la palma seguramente aparecerá borrosa. Esta simple demostración ilustra el hecho de que el control de la posición de los ojos es más eficaz cuando se dispone de información de los receptores vestibulares, y no únicamente de los receptores visuales.

Otro ejemplo de compensación vestibular es el reflejo involuntario conocido como "ojos de muñeca" del recién nacido. Este reflejo está controlado principalmente por los órganos otolíticos. Mantengamos al recién nacido en posición vertical con su mirada dirigida hacia adelante; si inclinamos su cuerpo lentamente hacia atrás o hacia un lado, los ojos girarán en sentido opuesto para mantener la orientación inicial en el espacio. Este reflejo desaparece gradualmente durante el primer mes, a medida que la orientación visual pasa a estar controlada progresivamente por estímulos visuales.

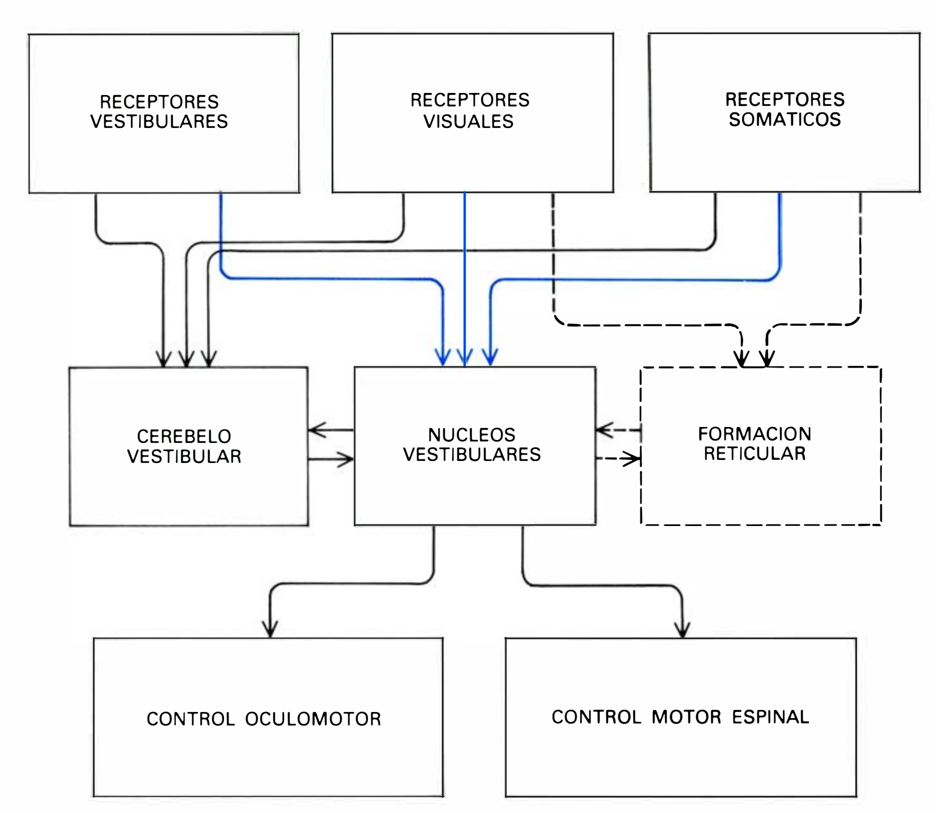
Uno de los primeros estudios cuantitativos de un sistema de compensación multimodal fue realizado en los peces por Erich von Holst, del Instituto Max Planck de Fisiología de la Conducta en Seewiesen, Alemania Occidental. Von Holst demostró que la orientación de un pez en el agua dependía de dos factores: la luz y la aceleración. En su ambiente natural, los peces nadan horizontalmente en respuesta a una iluminación superior y a la aceleración vertical de la gravedad. Cuando von Holst alteraba estos parámetros, variando la dirección de la iluminación o la aceleración lineal (haciendo girar rápidamente la pecera), observaba que los peces adoptaban una posición que era de compromiso entre la luz y la aceleración.

Por ejemplo, si en condiciones normales de fuerza gravitatoria von Holst iluminaba los peces desde detrás y no desde arriba, los peces se inclinaban hasta formar un ángulo en el que la luz incidiera sobre su espalda y la gravedad actuara sobre su abdomen. Cuando a un pez al que se le habían extirpado quirúrgicamente los receptores otolíticos se le sometía al mismo experimento, respondía únicamente a la luz horizontal, y nadaba en línea recta hacia arriba. Variando los parámetros de luz y aceleración, von Holst logró determinar la magnitud relativa de su contribución en la orientación de los peces. Los peces nadaban según un ángulo que podía predecirse sumando el seno del ángulo de la luz incidente y el seno del ángulo de la aceleración lineal.

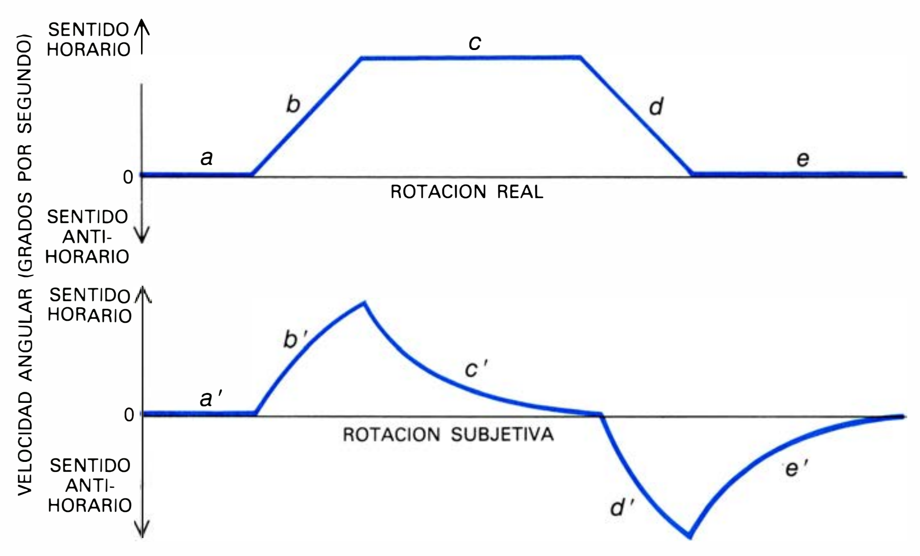
La compensación de una alteración del sistema de mantenimiento del equilibrio y orientación puede implicar un cambio en la orientación de un receptor, tal como ocurre en el reflejo de los "ojos de muñeca". Este tipo de compensación se ha denominado compensación externa. En los seres humanos, la capacidad de ajustar la postura corporal y la posición de los ojos es limitada; existe algún tipo de compensación interna originada en el cerebro, que no depende del ajuste de los receptores. En nuestro laboratorio de la Universidad de Miami hemos iniciado líneas de investigación sobre el sistema multimodal de compensación interna frente a alteraciones visuales en seres humanos. Una forma de compensación aparece al inclinar la cabeza; por ejemplo, el marco de una puerta se observa vertical tanto si la cabeza está en posición vertical como si está inclinada sobre un hombro. Cuando se inclina la cabeza, la imagen del marco de la puerta se forma sobre un grupo de receptores de la retina diferente del que se formaba cuando la cabeza estaba vertical. La percepción del marco de la puerta debe modificarse de algún



COMPENSACION MULTIMODAL frente a alteraciones de la orientación. Pudo comprobarse en experimentos llevados a cabo con el lábrido *Crenilabrus*. Normalmente, el pez (*arriba, a la izquierda*) se orienta colocándose en posición horizontal en respuesta a dos tipos de información: la iluminación superior y la tracción hacia abajo debida a la fuerza de gravedad. Cuando se ilumina el pez desde atrás (*abajo, a la izquierda*), su orientación se altera y adopta una posición de compromiso: se inclina respondiendo en parte a la iluminación horizontal y en parte a la aceleración vertical. Un pez cuyos receptores otolíticos hayan sido extirpados quirúrgicamente (*arriba, a la derecha*) no puede percibir la aceleración de la gravedad y se orienta únicamente respecto a la iluminación superior. Cuando se ilumina el mismo pez desde la parte posterior (*abajo, a la derecha*) adopta la posición vertical, es decir, responde únicamente a la iluminación. Este experimento, uno de los primeros estudios cuantitativos de un sistema de compensación multimodal, fue realizado por Erich von Holst, del Instituto Max Planck, Alemania.



VIAS NERVIOSAS para el mantenimiento del equilibrio y la orientación. En la parte superior se muestran los tres tipos de entrada de información: receptores vestibulares, receptores visuales y receptores somáticos (piel y articulaciones). Estos receptores transmiten impulsos a tres centros de elaboración de información del sistema nervioso: el cerebelo vestibular (una región del cerebelo, en la parte posterior del cerebro), los núcleos vestibulares (un grupo de células nerviosas del tronco cerebral, situado justamente por encima de la médula espinal) y la formación reticular (otro grupo de células nerviosas del tronco cerebral), que se muestra aquí enmarcada en un recuadro de línea discontinua porque su función no es del todo clara. Una vez que se ha elaborado la información, los núcleos vestibulares transmiten impulsos a uno de los dos centros siguientes: el sistema de control oculomotor o el sistema espinal de control de la motilidad. El sistema oculomotor coordina los movimientos de los ojos; el sistema motor espinal controla las contracciones del cuello, extremidades y músculos corporales. Vías secundarias que conectan con el tálamo y la corteza cerebral pueden activarse a consecuencia de una estimulación del aparato vestibular que dé lugar a sensaciones de movimiento y de orientación.



ILUSION ROTATORIA provocada cuando una persona privada de información visual gira en una plataforma. La gráfica de rotación real (*arriba*) muestra que, partiendo de una posición estacionaria (*a*), la persona con los ojos vendados es sometida a un movimiento rotatorio en el sentido de las agujas del reloj a una velocidad que aumenta progresivamente (*b*); se mantiene constante la velocidad durante un tiempo (*c*), y se va reduciendo la velocidad (*d*) hasta que la plataforma permanece de nuevo estacionaria (*e*). En la parte inferior, una gráfica muestra cómo percibe el sujeto su movimiento de rotación. Durante el tiempo en que permanece estacionario (*a'*) y mientras la velocidad aumenta (*b'*), la interpretación subjetiva del movimiento es correcta. Después de girar durante un tiempo a velocidad constante experimenta la sensación de que la velocidad disminuye y, finalmente, de que no hay movimiento en absoluto (*c'*). Cuando la velocidad real de rotación decrece, el sujeto imagina que está girando en sentido contrario a las agujas del reloj (*d'*); inmediatamente después de cesar la rotación, la sensación subjetiva es la de un movimiento rotatorio en sentido antihorario, que va decreciendo hasta alcanzar el reposo (*e'*).

modo a fin de que siga apareciendo en posición vertical.

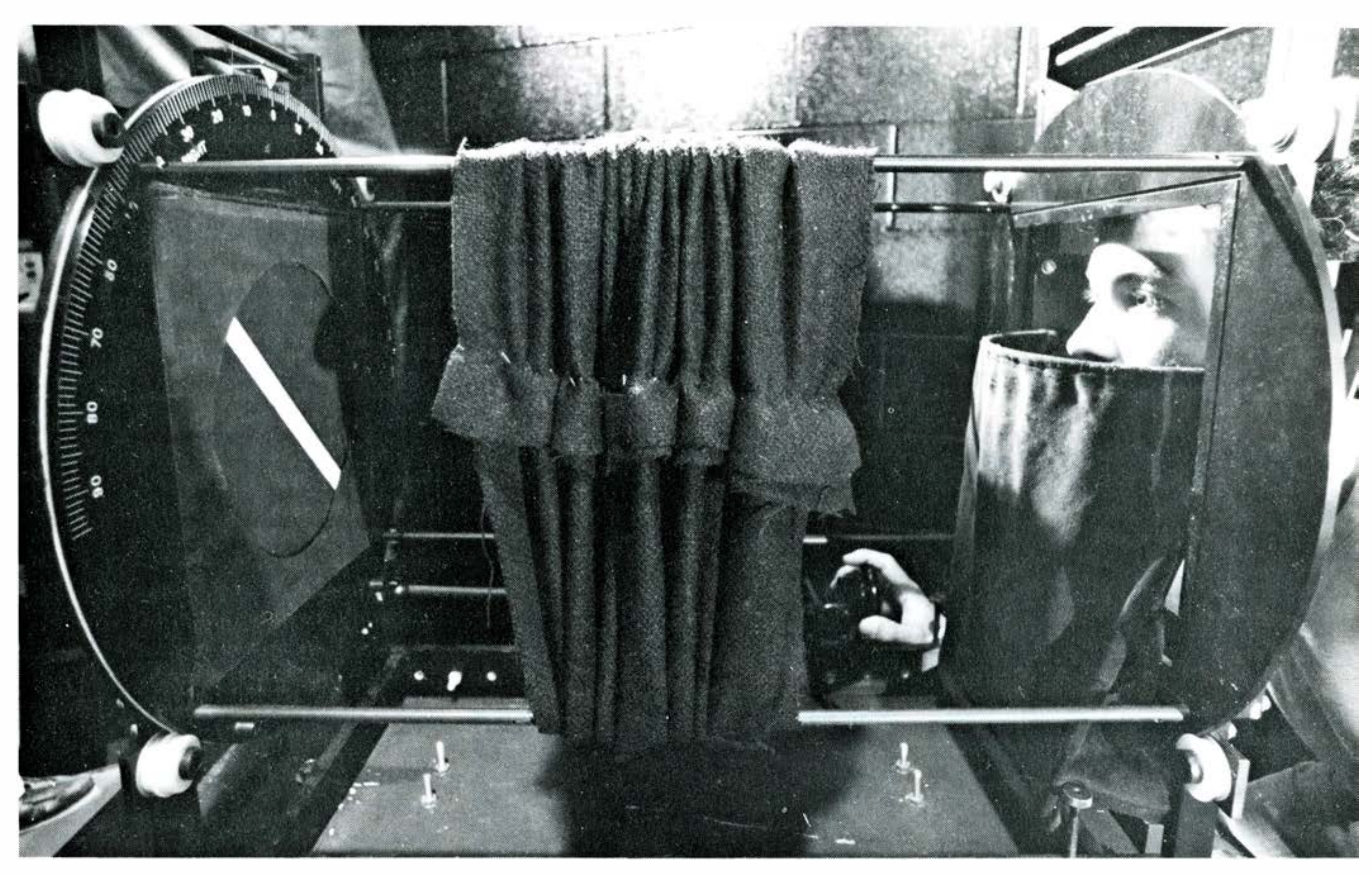
El proceso de compensación interna ha sido estudiado por Horst Mittelstaedt, del Instituto Max Planck de Fisiología de la Conducta, y Norbert Bischof, del Instituto de Tecnología de California, utilizando un modelo teórico de un sistema de control denominado "reticular" o "anterógrado". De acuerdo con este modelo, los impulsos procedentes de receptores vestibulares, visuales y somáticos inciden en el cerebro y se integran. Cada impulso tiene asignado un valor particular en el balance final que determina la compensación. Junto a mis colaboradores, hemos iniciado experimentos para verificar tal hipótesis.

Los sujetos experimentales se colocaban en una habitación oscura y se les preguntaba cuál era la orientación de una línea luminosa respecto a algunos ejes corporales. Las respuestas se registraban al variar dos conjuntos de parámetros, correspondientes a dos fuentes de compensación de la información: la vestibular y la somática. A fin de variar la información procedente del órgano otolítico, el sujeto experimental debía orientar la línea luminosa estando sentado o descansando en posición horizontal. Para variar la información procedente de los receptores del cuello debía orientar la línea luminosa manteniendo la cabeza en posición vertical, alineada con el resto del cuerpo, o bien inclinada 30 grados sobre su hombro. Mediante la alteración de estas condiciones en múltiples combinaciones pretendíamos determinar cuál era el valor relativo de los dos tipos de información que compensan las alteraciones de la orientación normal de los ojos.

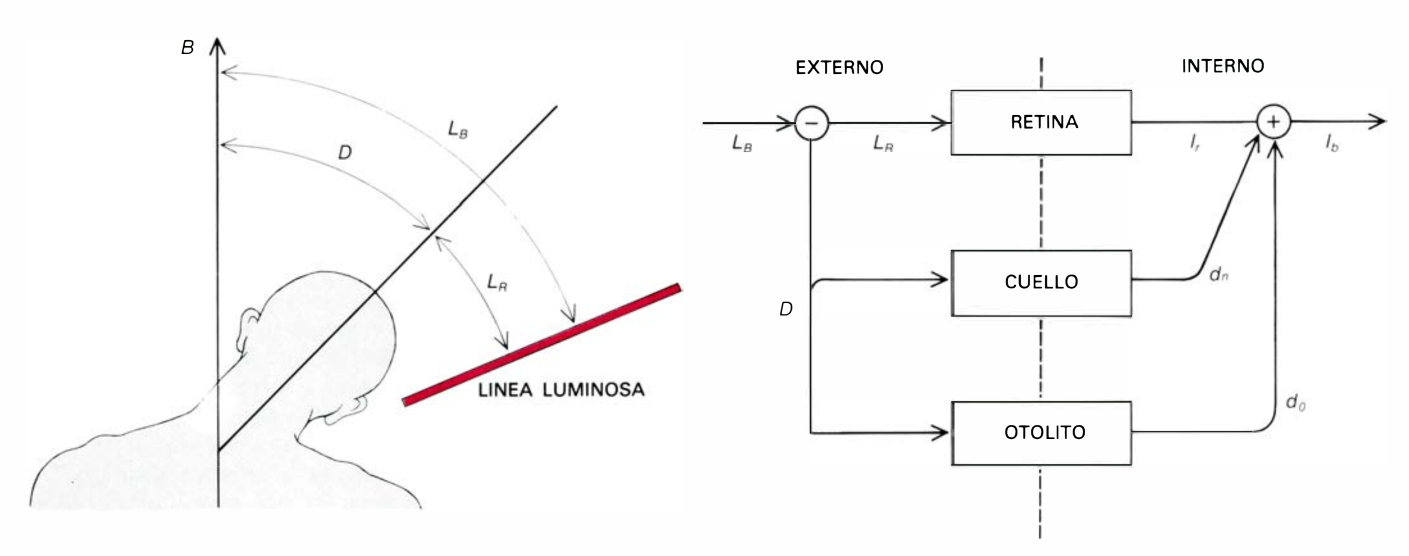
En posición vertical, el sujeto disponía de información procedente de los otolitos y de los receptores del cuello para compensar la inclinación de la cabeza. Cuando los sujetos yacían en posición horizontal, sin embargo, los receptores de los otolitos no daban información sobre la inclinación de la cabeza, puesto que cualquier posición en el nuevo plano de movimiento respondía por igual a la gravedad. Adelantamos que la compensación sería prácticamente completa disponiendo de ambas fuentes de información, pero incompleta cuando el sujeto en posición horizontal sólo dispusiera de la información procedente de los receptores del cuello. Las observaciones confirmaron tales predicciones. Un modelo basado en un sistema de con-

trol anterógrado explica la integración cerebral de ambos estímulos.

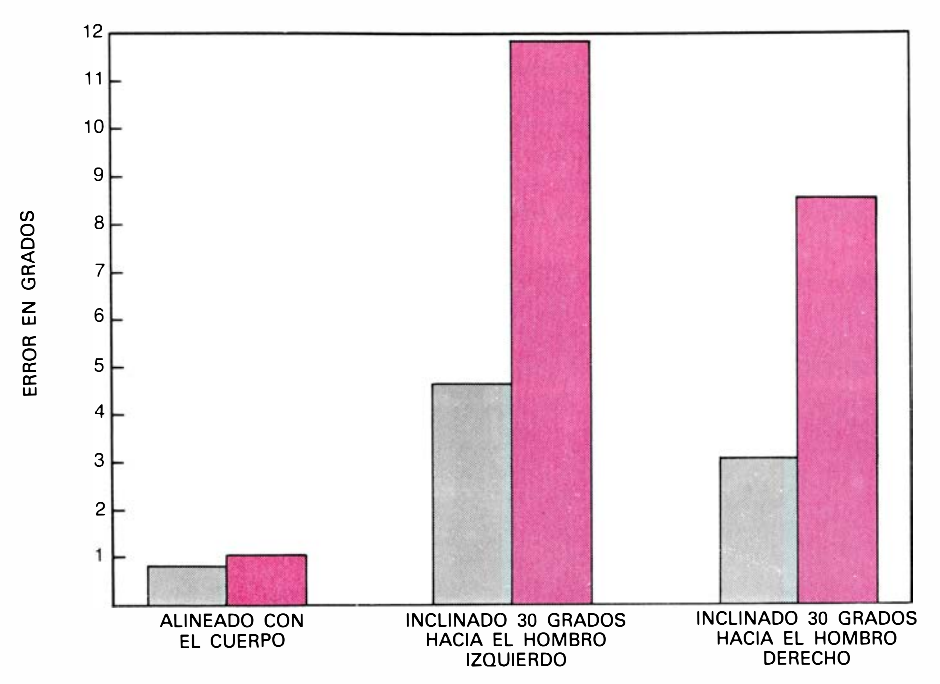
Otro factor que ha dificultado la determinación de la contribución del aparato vestibular en la orientación espacial es la capacidad adaptativa del animal o del organismo humano. Si un accidente o enfermedad altera las señales procedentes de un receptor sensorial, después de un período inicial de confusión se recupera la percepción y respuesta normales. Una técnica experimental clásica para el estudio de la adaptación consiste en alterar la información visual del sujeto haciéndole utilizar unas gafas que distorsionen el campo visual durante un largo período de tiempo. En la visión normal, cuando se gira rápidamente la cabeza para observar un objeto, los ojos giran primero para dirigirse al objeto y la



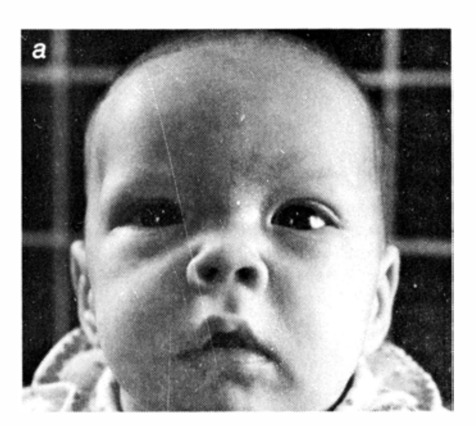
APARATO DE LABORATORIO utilizado para evaluar la capacidad de una persona a la hora de orientar una línea luminosa en relación con el eje de su cabeza o de su cuerpo. La persona situada a la derecha opera un control manual que permite girar la línea. En un experimento real, la cortina central se corre y el operador trabaja en la oscuridad. El experimento se realizó en dos posiciones: con el operador sentado, vertical, o yaciendo en posición horizontal. La cabeza se alineaba con el cuerpo o se inclinaba, bien 30 grados hacia el hombro izquierdo o bien 30 grados hacia el hombro derecho.



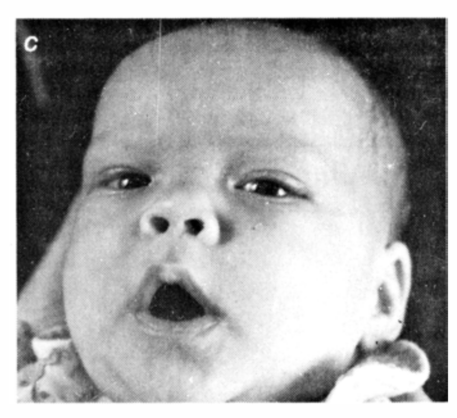
MODELO DE SISTEMAS de control biológico que sugiere cómo la persona que realiza el experimento de la línea luminosa compensa la inclinación de la cabeza. El sujeto experimental (*representado a la izquierda*) debía estimar el ángulo formado por la línea luminosa (L_B) y el eje del cuerpo (*B*). Al inclinar la cabeza sobre el hombro se produce una alteración del equilibrio y la orientación (*D*), variando también la orientación de la línea en la retina (L_R). Para estimar L_B el sujeto debía sumar L_R y *D*. En el modelo de sistema de control biológico (*derecha*) se representa la línea luminosa por L_B y la inclinación de la cabeza por *D*. Los receptores del cuello y los otolíticos generan impulsos que indican el grado de inclinación (d_n, d_O). Tales señales se suman a las que produce la línea en la retina (l_r); se estima así, en el sistema nervioso central, la orientación de la línea respecto al eje corporal (l_b).

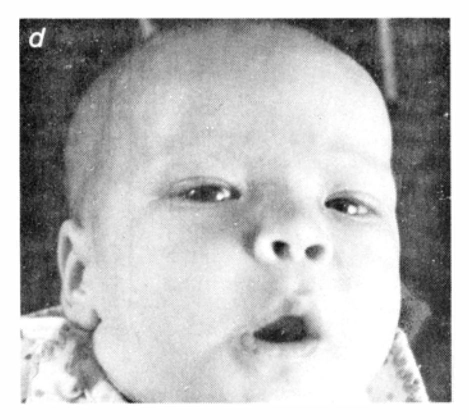


COMPENSACION INCOMPLETA de una alteración de la orientación. La tabla muestra los resultados del experimento de la línea luminosa. Cuando la cabeza del sujeto experimental está alineada con el cuerpo, la orientación de la línea con respecto al eje corporal se realiza con un error medio de un grado, tanto en posición vertical (*barra gris izquierda*), como horizontal (*barra coloreada izquierda*). Inclinando la cabeza, se provoca una alteración de la orientación y el rendimiento disminuye. En posición vertical, el sujeto disponía de información procedente de los receptores del cuello y de los receptores otolíticos para compensar la inclinación de la cabeza; el error en este caso era inferior a los 5 grados (*barras grises central y derecha*). En posición horizontal, los receptores otolíticos no envían información sobre la posición de la cabeza, porque cualquier postura dentro de este nuevo plano de movimiento da la misma respuesta a la gravedad; el error cometido era entonces de unos 12 grados (*barras coloreadas central y derecha*).









REFLEJO DE LOS "OJOS DE MUÑECA" en recién nacidos. Este reflejo demuestra una compensación vestibular frente a una alteración de la orientación. Se mantiene el recién nacido en posición vertical de forma que su mirada se dirija hacia adelante en línea recta (*a*). Si inclinamos su cuerpo hacia atrás (*b*), los ojos bajarán la mirada a fin de mantener su orientación inicial en el espacio. Si al cuerpo del niño se le aplica una rotación lenta hacia la derecha (*c*) o hacia la izquierda (*d*), sus ojos girarán en sentido opuesto. Estos reflejos están controlados principalmente por los receptores otolíticos y van desapareciendo a medida que los visuales asumen más importancia en el mantenimiento de la orientación y el equilibrio.

cabeza sigue luego el mismo movimiento. Los ojos deberán moverse entonces en sentido opuesto a fin de no sobrepasar el objeto.

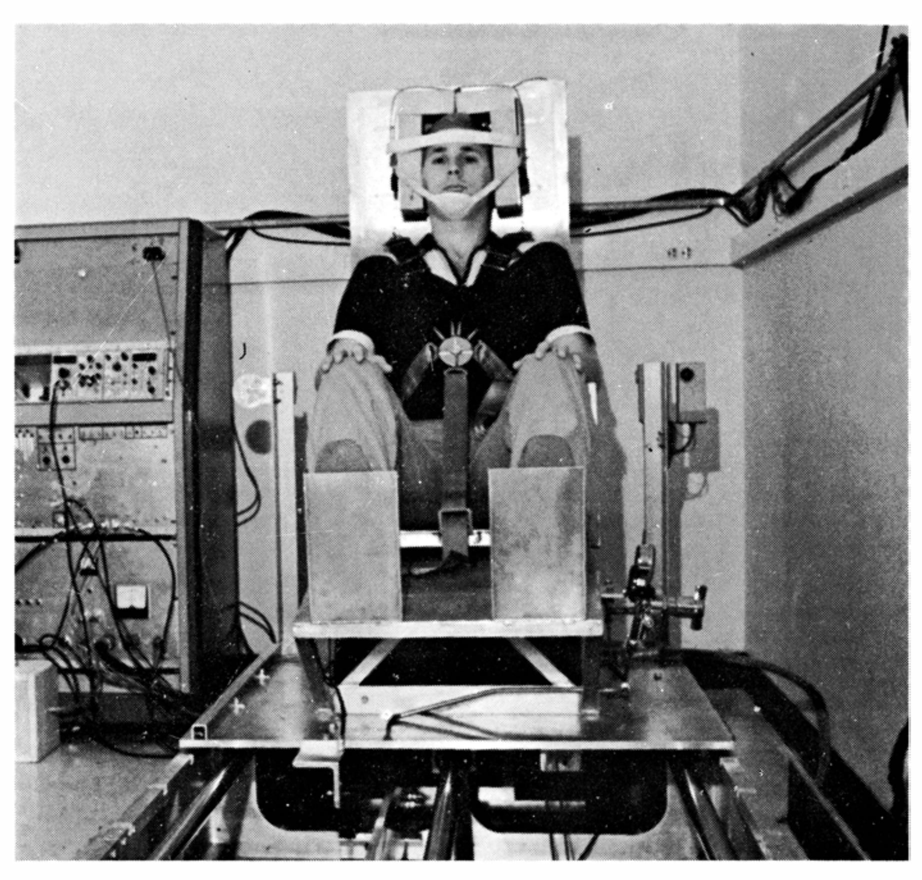
Cuando un sujeto utiliza gafas que desplazan lateralmente las imágenes, es incapaz, al principio, de correlacionar sus movimientos oculares y de la cabeza. Después de un período de adaptación puede hacerlo sin dificultad. La misma capacidad de adaptación se ha observado en animales y seres humanos con defectos en el aparato vestibular. Se supone que la adaptación, al igual que la compensación, tiene lugar en alguna región del sistema nervioso central.

Para que la adaptación ocurra se requiere un reajuste de los estímulos del equilibrio y orientación durante un período prolongado de tiempo. Los ajustes temporales, como los que tienen lugar cuando el individuo recibe información contradictoria de los receptores vestibulares, visuales y somáticos, provocan la desorientación del individuo. Por ejemplo, es posible hacer creer a un sujeto experimental, con los ojos vendados, que se encuentra inmóvil, cuando en realidad está girando, o que está girando en un sentido determinado cuando en realidad da vueltas en sentido opuesto. Al quitar la venda de los ojos los estímulos visuales dominan sobre los procedentes de los canales semicirculares y, después de un breve período de confusión, el sujeto percibe normalmente el sentido de su movimiento. Este experimento demuestra la existencia de una adaptación muy rápida, que puede denominarse supresión vestibular.

En los anteriores experimentos, los sujetos se colocaban sobre una plataforma que se hacía girar a una cierta velocidad angular. La velocidad se mantenía constante durante uno o dos minutos y luego disminuía progresivamente hasta quedar inmóvil. Al comenzar la rotación, la persona colocada en la plataforma percibía el sentido real del movimiento. Tras un período de rotación a velocidad constante, tenía la sensación de permanecer inmóvil. Cuando la velocidad angular disminuía, percibía una rotación en sentido opuesto a la rotación real.

Los errores de interpretación pueden explicarse por las propiedades físicas de los canales semicirculares. Puesto que los canales responden a aceleraciones angulares y no a velocidades angulares, la persona no puede distinguir entre una rotación a velocidad constante y la posición estacionaria. Después

de un período de rotación a velocidad constante, los canales semicirculares no detectan la rotación. Dado que una aceleración en el sentido de las agujas del reloj produce la misma reacción que una disminución de la velocidad en sentido contrario, el sujeto experimental interpreta que ha cesado la rotación en un sentido y que ha empezado a girar en sentido opuesto. Ilusiones similares en desplazamientos lineales las experimentan los pasajeros de un avión que vuela a través de nubes. Aunque el avión se desplaza a una velocidad constante, el pasajero, que no percibe ninguna aceleración y no puede ver el suelo, tiene la sensación de que el avión está inmóvil.



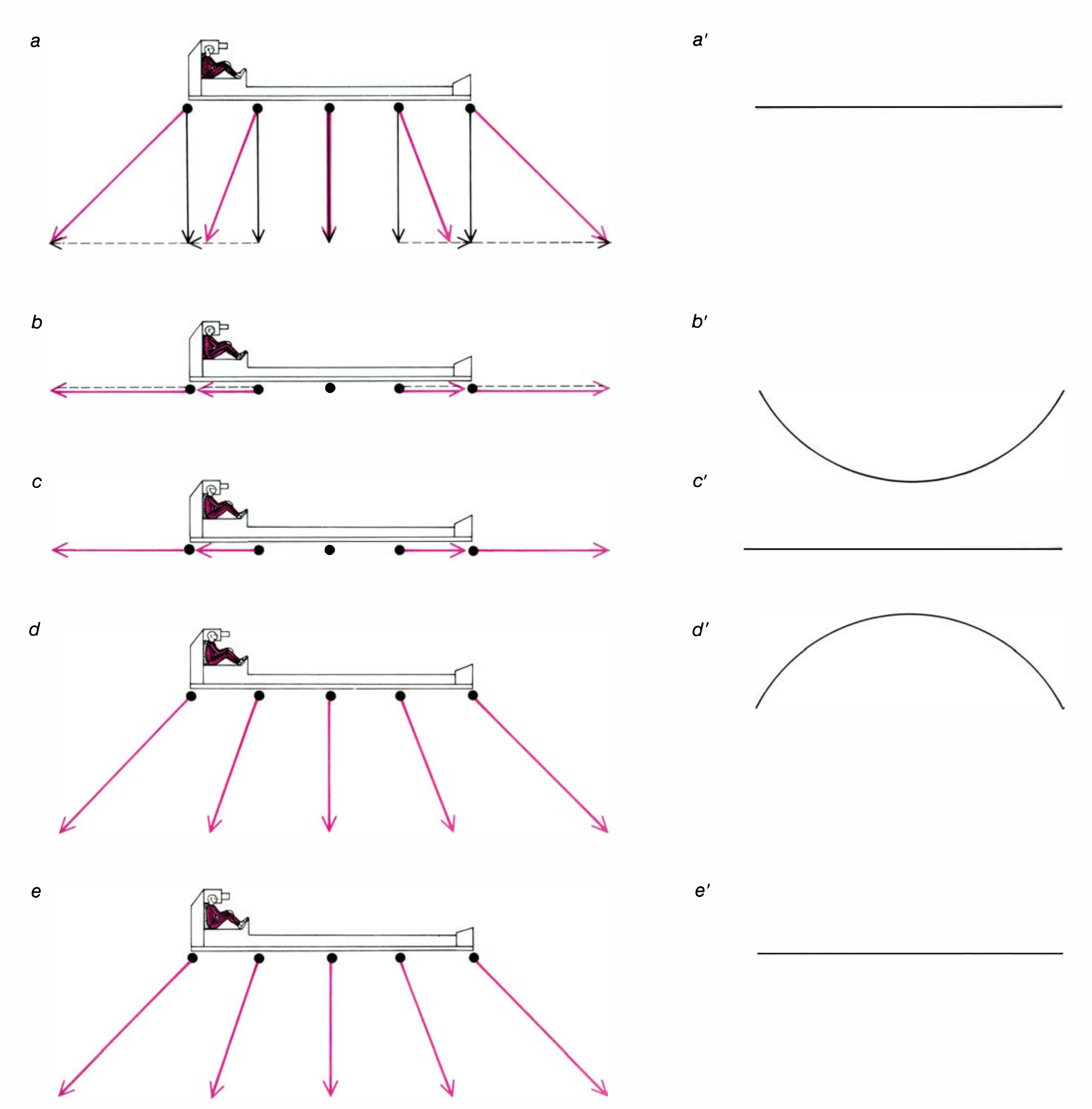
TRINEO similar al que habrá de emplearse en el Spacelab, un módulo orbital reutilizable, para estudiar la adaptación de los astronautas a la situación de ingravidez. Los astronautas, con los ojos vendados, se desplazarán adelante y atrás en el trineo y expresarán sus sensaciones operando un mando de control.

La ingravidez de un laboratorio espacial puede crear un reajuste de estímulos sensoriales análogo al producido por las lentes que distorsionan la visión. Consideremos el caso de un astronauta que inclina su cabeza hacia el hombro. Los estímulos visuales y somáticos serán los mismos que se producen estando el astronauta en tierra, y la información de los canales semicirculares al mover la cabeza será también la misma. En ausencia de gravedad, sin embargo, los receptores otolíticos no indicarán que haya tenido lugar la inclinación de la cabeza. La información que llega al sistema de orientación del astronauta ha experimentado un reajuste.

Los reajustes de la información sensorial provocados por la ingravidez constituyen un modelo experimental para la investigación del sistema vestibular. Las misiones de los laboratorios espaciales harán posible tal investigación. Los laboratorios espaciales Spacelab son módulos reutilizables que serán puestos en órbita durante un período de siete a 21 días y volverán luego a tierra transportados por la aeronave Space Shuttle. Después de las misiones iniciales, programadas para 1982, los vuelos de los laboratorios espaciales estarán dedicados a determinadas disciplinas. Entre las misiones dedicadas a investigaciones biológicas, que tendrán lugar con intervalos de 12 a 18 meses a partir de 1984, se han programado estudios sobre el sistema vestibular. Los experimentos los realizarán grupos de investigadores de distintos países, con la finalidad de lograr un mejor conocimiento del sistema vestibular y con la esperanza de que esta investigación básica ayude a resolver los problemas prácticos planteados por el mareo en los vuelos espaciales.

Uno de los experimentos que hemos propuesto, en colaboración con Millard F. Reschke y Jerry L. Homick, del Centro Espacial Johnson, evaluará las diferencias en la percepción del movimiento asociadas a la adaptación a la ingravidez. Los astronautas, con los ojos vendados, montados sobre un trineo, se desplazarán adelante y atrás sobre carriles lineales colocados en el módulo espacial. Los astronautas indicarán su percepción del movimiento operando una palanca de mando. Uno de nuestros modelos predice que los astronautas percibirán al principio un movimiento parabólico, como si estuvieran columpiándose (aunque este movimiento es en realidad semicircular). Después de un período de adaptación a la ingravidez interpretarán adecuadamente el movimiento que realizan como lineal. Inmediatamente después de regresar a tierra, percibirán el mismo movimiento como parabólico, pero en un sentido opuesto al que experimentaban en el espacio. Después de permanecer un largo período de tiempo sobre la tierra, percibirán de nuevo el movimiento lineal del trineo.

Este experimento puede demostrar la capacidad humana para adaptarse a un reajuste de estímulos sensoriales. Cuando una persona experimenta en la tierra un movimiento de aceleración hacia delante o atrás en un trineo que se desplaza sobre un carril lineal, percibe una aceleración lineal, pero no detecta la aceleración constante de la gravedad en sentido vertical. De hecho, la persona está expuesta a una aceleración angular, resultado de sumar la aceleración horizontal variable y la aceleración vertical constante. El cerebro interpreta la aceleración angular como un movimiento lineal. La sensación de movimiento lineal ha sido, pues, elaborada por el cerebro. La exposición inicial del astronauta a la ingravidez implica que el único estímulo de aceleración detectado por sus receptores otolíticos procede del movimiento del trineo; en ausencia de gravedad, su cerebro interpretará que existe una fuerza opuesta a la de la gravedad, lo que producirá la sensación de viajar en una trayectoria parabólica. Cuando se hayan adaptado a la ingravidez, los astronautas interpretarán el movimiento como lineal, pues ya no esperarán una fuerza que los empuje hacia el asiento del trineo. A su vuelta a la tierra, sentirán la fuerza de gravedad como algo extraño, que los empuja hacia abajo y, hasta que su sistema nervioso se haya adaptado de nuevo al



ILUSION DE MOVIMIENTO que podrían experimentar los astronautas sometidos a movimientos oscilantes en un trineo durante el vuelo del Spacelab. El experimento demostrará la capacidad humana para adaptarse a un reajuste sensorial provocado por la ingravidez. La columna de la izquierda muestra la aceleración experimentada por los astronautas en distintos puntos a lo largo del carril durante los cinco estadios del vuelo. El diagrama superior (*a*) ilustra la aceleración que afectará a los astronautas antes del despegue; esta misma aceleración les afectará siempre que se encuentren en la tierra (*d, e*). La aceleración producida por el trineo (*flecha de trazo interrumpido*) será máxima en los extremos del carril. En el centro, los astronautas no experimentarán aceleración horizontal. La fuerza de la gravedad (*flecha negra*) ejerce una tracción hacia abajo equivalente a acelerar un objeto en la ingravidez a 980 centímetros por segundo al cuadrado; la aceleración de los astronautas debida a la gravedad es constante en todos los puntos del carril. La aceleración total (*flecha coloreada*) es la suma de las aceleraciones horizontal y vertical. Los astronautas sometidos a un movimiento oscilante mientras se encuentran en tierra estarán, pues, bajo los efectos de la resultante de ambas aceleraciones. En el espacio, donde no existe la fuerza de la gravedad, los astronautas experimentarán únicamente la aceleración producida por el trineo (*b, c*). La columna de la derecha muestra la sensación subjetiva de los astronautas sobre el movimiento que realizan (según las predicciones del autor) durante las cinco fases del vuelo. Antes de despegar, los astronautas percibirán su movimiento como lineal (*a'*). Al verse sometidos a la ingravidez, experimentarán primero la sensación de viajar en una trayectoria parabólica (*b'*). Cuando los astronautas se hayan adaptado a la ingravidez, nuevamente tendrán la sensación de un movimiento lineal (*c'*). A su regreso a tierra, percibirán el movimiento como una trayectoria parabólica orientada en sentido opuesto a la que habían imaginado en el espacio (*d'*). Después de un período prolongado en la tierra interpretarán de nuevo el movimiento como lineal (*e'*). Los cambios registrados en la percepción del movimiento demostrarían la capacidad de nuestro sistema nervioso central para adaptarse a un reajuste de los estímulos sensoriales.

ambiente terrestre, percibirán el movimiento del trineo como una trayectoria parabólica dirigida ahora en sentido opuesto al que habían imaginado en el espacio.

La experiencia de ingravidez se utilizará también en relación con el sistema multimodal que compensa las alteraciones de la orientación. El modelo de sistema de control biológico, que compensa la inclinación de la cabeza y que ha sido elaborado a partir de los experimentos realizados en nuestro laboratorio con líneas luminosas, indica que la compensación visual depende del valor de determinadas señales procedentes de los receptores otolíticos y de los receptores del cuello en personas que permanecen sobre la tierra en posición vertical. Los estudios realizados con los astronautas del Skylab por Ashton Graybiel y Earl F. Miller II, de la Estación Aeronaval de Pensacola, y por Homick han mostrado que la capacidad de los astronautas para orientarse respecto a una línea luminosa no se veía alterada por la ausencia de gravedad. Partiendo de esta observación, Reschke, Homick y el autor han proyectado un experimento a realizar en el Spacelab para evaluar los cambios en la intensidad de las señales de los receptores del cuello durante la compensación por la ausencia de información procedente de los receptores otolíticos en un medio sin fuerza de gravedad.

Hemos propuesto que los astronautas repitan con intervalos de 24 a 48 horas durante la misión espacial los experimentos con líneas luminosas previamente realizados en el laboratorio. Nuestro modelo predice que, en la ingravidez, aumentará la intensidad de las señales compensadoras procedentes de los receptores del cuello y la habilidad para señalar la posición de la línea luminosa aumentará progresivamente a medida que los astronautas se adapten al reajuste de los estímulos necesarios para la orientación resultante de la ausencia de señales de los receptores otolíticos. De acuerdo con este modelo, a su retorno a la tierra los astronautas mostrarán reacciones de compensación exageradas al realizar la misma prueba.

Otro proyecto a desarrollar en las primeras misiones del Spacelab será la investigación del mareo provocado por los viajes espaciales. Catorce de los treinta y cuatro astronautas de las misiones Apolo y Skylab, es decir, el 41 por ciento, mostraron signos de mareo (palidez, sudoración fría, náuseas y vómitos) en los períodos iniciales de ingravidez. (El proyecto Apolo se refiere a los alunizajes tripulados; el Skylab era un laboratorio de investigación espacial utilizado durante los años 1973 y 1974.) El mareo podría disminuir el rendimiento de los astronautas durante las misiones del laboratorio espacial y ha sido considerado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, NASA, como uno de los principales problemas a resolver en los vuelos iniciales.

Los datos actuales sugieren que el mareo experimentado en condiciones de ingravidez podría estar asociado al aparato vestibular. Graybiel estudió en personas con defectos en el sistema vestibular las reacciones al vuelo parabólico en aviones que se desplazaban a gran velocidad. En tales vuelos, la aeronave asciende y desciende siguiendo trayectorias parabólicas. Al comienzo del desplazamiento, los ocupantes de la aeronave experimentan la sensación de una aceleración lineal; en la cúspide de la trayectoria, durante 30 segundos, no experimentan la fuerza de gravedad y, al final, sienten una nueva aceleración lineal. Tal secuencia provoca síntomas de mareo en personas con un sistema vestibular normal. Sin embargo, en los casos estudiados por Graybiel, en los que existían alteraciones del sistema vestibular, no aparecieron tales síntomas.

Entre los investigadores del sistema vestibular, la explicación más generalizada para el mareo espacial, o el propio de los viajes terrestres, es el desajuste sensorial, es decir, la disparidad de la información relativa a la orientación procedente de distintos receptores. Por ejemplo, una persona que durante una tormenta en el mar permanece en su camarote, recibe información visual de que la posición de su cuerpo permanece inmóvil respecto al medio que le rodea, el camarote, que permanece también estacionario. Cuando el barco es zarandeado por la tormenta, la información que proporciona el aparato vestibular es distinta a la información visual y de ello puede resultar la aparición del mareo. A consecuencia del reajuste sensorial resultante de la ingravidez, puede producirse una disparidad sensorial semejante durante los vuelos espaciales.

Los experimentos realizados en el Skylab con una silla giratoria programable sugirieron una mayor contribución de los receptores otolíticos en la producción de mareo de lo que se había sospechado. Graybiel y colaboradores estudiaron los síntomas del mareo provocado por aceleraciones angulares cruzadas. Tal situación se produce cuando los canales semicirculares entran y salen del plano de rotación de la totalidad del cuerpo. En los experimentos realizados por Graybiel, un astronauta movía su cabeza siguiendo determinados ángulos mientras giraba en la silla a velocidad constante. En tierra, las aceleraciones angulares cruzadas producían mareo y alteraciones de la orientación espacial. Sorprendentemente, los astronautas del Skylab indicaban que, en situación de ingravidez, no sentían ninguno de los síntomas del mareo, incluso después de una larga exposición a aceleraciones angulares cruzadas. Aunque es difícil interpretar estos resultados, los experimentos sugieren que los síntomas de mareo producidos por movimientos de la cabeza durante la rotación tendrían su origen en la disparidad entre la información procedente de los órganos otolíticos y la información de los canales semicirculares. En el espacio, donde los órganos otolíticos no responden a la fuerza de la gravedad, el desajuste sensorial quedaría notablemente reducido.

La hipótesis propuesta puede resultar inadecuada para explicar todos los casos de mareo espacial. Uno de los astronautas del Skylab era tan insensible a los desajustes sensoriales durante los entrenamientos, que recibió el apodo de "Lead Ear" (Oído de plomo). Al comienzo del vuelo del Skylab, sin embargo, experimentó intensos mareos durante varios días. Tales observaciones han sugerido a distintos investigadores que el mareo podría estar asociado a estímulos vestibulares causados por importantes desplazamientos de los líquidos corporales cuando los astronautas entran en ingravidez. En ausencia de gravedad, los músculos de las extremidades inferiores desplazan los líquidos hacia el tronco y la cabeza. En consecuencia, las extremidades inferiores están adelgazadas ("patas de pollo"), mientras la cara aparece abultada y se presenta un flujo nasal continuo. Posiblemente, se produce una alteración del equilibrio de líquidos en el laberinto. Datos que apoyen tal hipótesis podrían obtenerse de los experimentos a realizar en los vuelos de los laboratorios espaciales. Ciertamente, la era del Spacelab promete ser revolucionaria en todas las áreas de la investigación del sistema vestibular.

Superconductores en circuitos de potencia

Para aprovechar los materiales que transportan corriente sin pérdidas, hubo que aguardar hasta la creación de los superconductores, que soportan altas densidades de corriente y fuertes campos magnéticos

T. H. Geballe y J. K. Hulm

Desde que se descubrió la superconductividad, hace unos 70 años, la suerte tecnológica de los materiales superconductores estuvo echada. Un hilo que no ofrece resistencia al paso de una corriente eléctrica permanente suscita la posibilidad de generar energía eléctrica con un rendimiento próximo al 100 por ciento y su transmisión sin pérdidas a largas distancias. ¿Por qué no están llenos de superconductores, pues, los circuitos de potencia? Más. ¿Por qué motivo no se ha comercializado todavía ningún generador o línea de transmisión superconductora?

Entre los problemas a los que tiene que hacer frente esta tecnología está el de la refrigeración. La superconductividad se consigue sólo a temperaturas próximas al cero absoluto; por tanto, se precisa helio líquido como refrigerante. La necesidad de aparatos criogénicos excluye de partida la aplicación a pequeña escala de los superconductores; no servirían, pues, en los circuitos eléctricos domésticos, por ejemplo. Sin embargo, en una gran central generadora de energía la refrigeración representa sólo un coste pequeño e inconvenientes de importancia mínima.

Hasta la década de 1960 existía un impedimento más serio contra la adopción de la tecnología de energía superconductora: los superconductores conocidos tendían a extinguirse o a ser restablecidos a su estado resistivo normal, si se los exponía a un fuerte campo magnético o si se los forzaba a transportar una alta densidad de corriente eléctrica. Las máquinas eléctricas de gran tamaño, dínamos por ejemplo, requieren casi invariablemente un campo magnético intenso y una alta densidad de corriente para funcionar con eficiencia.

Se han descubierto cierto número de aleaciones y compuestos superconductores no usuales que retienen su superconductividad incluso cuando se los somete a intensidades de campo y a densidades de corriente extremadamente altas. Estos materiales poseen también las temperaturas de transición hacia el estado de superconducción más altas, aunque sigue siendo necesaria la refrigeración por helio. Con la introducción de estas aleaciones y compuestos, se han salvado los principales obstáculos que se oponían a la creación de un sistema de potencia de superconducción. Los problemas que restan son más tecnológicos y económicos que físicos.

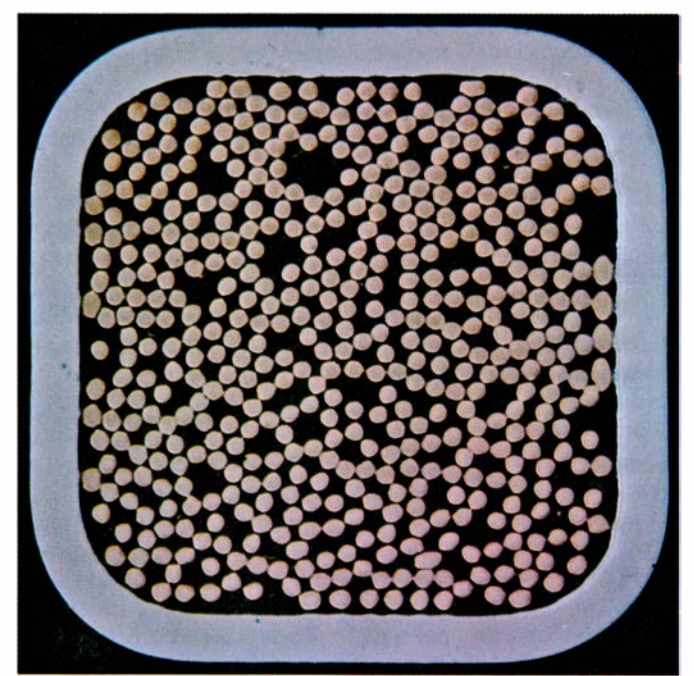
Los nuevos superconductores de campo y corriente altos ofrecen dos ventajas importantes para la industria eléctrica: pueden transportar grandes corrientes eléctricas a través de un calentamiento resistivo, sin pérdida alguna de energía, y pueden operar en campos magnéticos muy intensos. Consideradas aisladamente, ambas propiedades son valiosas; ahora bien, los mayores beneficios se recabarí probablemente de su combinación en un material único. Para explicar este punto convendrá dar un breve repaso a la historia de la tecnología de la energía eléctrica.

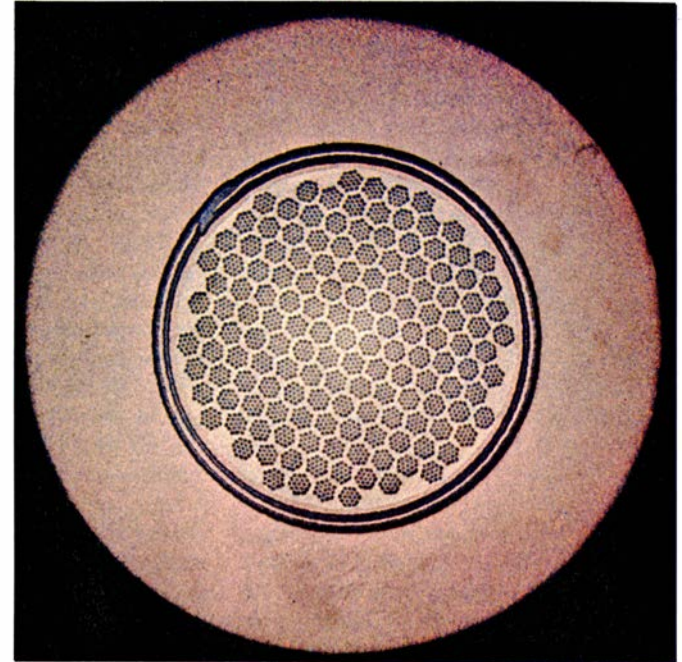
Dos hechos iniciales importantes fueron la invención de la batería electroquímica por Alessandro Volta en 1800 y el descubrimiento realizado en 1819 por Hans Christian Oersted de que la corriente eléctrica que fluía por un hilo conductor originaba un campo magnético local. En 1830, Michael Faraday, Joseph Henry y otros hallaron que el campo magnético así generado podía acrecentarse arrollando el conductor en una bobina o hélice dispuesta alrededor de un núcleo de hierro. Tales electroimanes se convirtieron en los bloques centrales de soporte del equipo de potencia.

El siguiente avance de interés se debe también a Faraday. Nos referimos a su descubrimiento, en 1831, de la inducción de corriente en un conductor producida cuando éste se mueve a través de un campo magnético. Más tarde, Faraday construyó modelos de generadores homopolares o de disco rotativo que generan corriente continua y modelos de bobina giratoria que generan corriente alterna. La explotación industrial de estos principios se retrasó hasta 1870, cuando la invención de la luz eléctrica creó un incentivo económico para la construcción de las redes comunitarias de energía eléctrica. La industria moderna de energía eléctrica se propagó rápidamente después de 1870 a través de los esfuerzos de inventores-empresarios tales como Thomas Edison y George Westinghouse.

Las ventajas de la transmisión de potencia a altas tensiones y de su generación y su utilización a tensiones mucho más bajas condujo pronto a la industria a adoptar la corriente alterna, por cuanto la trasformación de tensión resulta relativamente sencilla. A medida que los alternadores de las estaciones centrales aumentaron de tamaño, el modelo de generador Faraday fue evolucionando. Se hizo girar el electroimán en el centro de la máquina y se generó la potencia en bobinas fijas que rodeaban el imán. El desarrollo intensivo de esta idea en el siglo pasado permitió conseguir potencias de salida de más de 1000 megawatt en un solo alternador. En principio, con 400 máquinas de este tipo se podría cubrir la potencia actual consumida por los Estados Unidos.

Todas las máquinas eléctricas actua-





SUPERCONDUCTOR FILAMENTARIO, ideado para transportar una corriente de 16.000 ampère en los arrollamientos de un imán con un campo máximo de ocho tesla. El imán es uno de los seis que se están fabricando para ensayar diseños de imanes destinados a los reactores de fusión termonuclear. En la fotografía de la parte superior izquierda, aparece el cable entero, representado en sección transversal; consta de 486 cabos encerrados en un conducto de acero inoxidable, a cuyo través se bombeará helio a presión para mantener las bajas temperaturas necesarias para la superconductividad. La fotografía de la parte superior derecha recoge una sección transversal amplificada de un solo cabo. Unos 3000 filamentos superconductores, dispuestos en grupos hexagonales de 19, están embebidos en una matriz de bronce. El haz de filamentos está encajado en una camisa gruesa de cobre, que tomará la corriente si el superconductor se extingue, o si vuelve al estado resistivo. El anillo irregular que rodea los filamentos es una barrera de tantalio que impide que se difunda el estaño de bronce hacia la camisa de cobre. Una camisa exterior de semiconductor inhibe la formación de corrientes parásitas. La fotografía inferior es una micrografía electrónica de exploración de un grupo único de filamentos formados por el compuesto Nb_3Sn de niobio-estaño. El compuesto se fabrica in situ, permitiendo que el estaño del bronce reaccione con los filamentos de niobio metálico. En cada filamento puede distinguirse un núcleo de niobio sin reaccionar. El cable fue fabricado por Airco Superconductors para la Westinghouse Electric Corp.

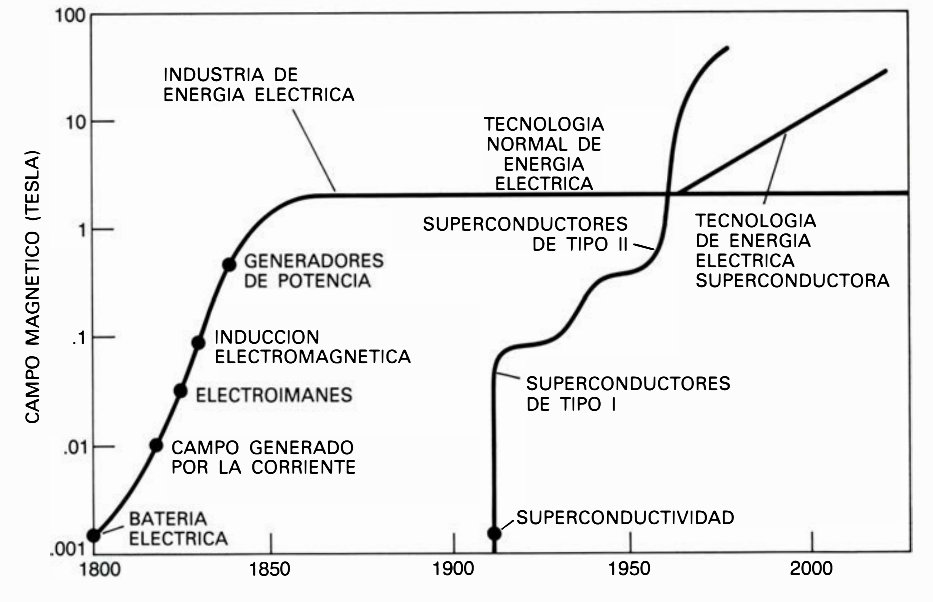
les se excitan mediante electroimanes que emplean bobinados de cobre. En estos aparatos, la mayor parte del flujo magnético proviene de la alta permeabilidad ferromagnética del hierro o de las aleaciones de hierro; los bobinados de cobre se limitan a aplicar un pequeño campo excitador al núcleo de hierro. Cada átomo de hierro, o de otro material ferromagnético, posee un momento magnético que puede ser inducido a alinearse con un campo magnético impuesto desde fuera. La proporción de momentos atómicos alineados depende de la tensión del campo aplicado y, por tanto, de la corriente de excitación. Incluso con una corriente relativamente pequeña, la mayoría de los momentos magnéticos están alineados, dando como resultado que la magnitud del campo magnético total supere en mucho a la atribuida a los propios bobinados aislados. Por consiguiente, la función del núcleo de hierro es acrecentar el campo magnético generado por la corriente de excitación.

Este proceso tiene un límite obvio; una vez que los momentos atómicos son paralelos, los incrementos ulteriores que puedan registrarse en la corriente de excitación no inciden ya en la magnetización. Se dice entonces que el núcleo está saturado. En el caso del hierro, la saturación se alcanza para una intensidad de campo de unas dos tesla, es decir, unos 20.000 gauss. (Para poder comparar, el campo magnético en la superficie de la tierra tiene un valor medio de un gauss aproximadamente.) Los imanes, las máquinas eléctricas y los restantes componentes del sistema de potencia están actualmente limitados en su rendimiento por la barrera de la saturación.

La barrera de flujo de dos tesla de la tecnología de potencia eléctrica no es rígida; podemos franquearla en el laboratorio de múltiples formas. Por ejemplo, el nivel de flujo de saturación de ciertos metales raros, tales como el dysprosium, se aproxima a cuatro tesla a baja temperatura. También pueden obtenerse campos magnéticos permanentes superiores a 20 tesla con bobinas solenoides de cobre de alta potencia refrigeradas por agua, del tipo de las que desarrollara, por primera vez, Francis Bitter hacia el año 1935. Mediante las técnicas avanzadas por Peter Kapitza, en 1920, o por la compresión explosiva del flujo magnético en una envoltura metálica, pueden alcanzarse campos de corta duración con valores de cresta todavía más conspicuos.

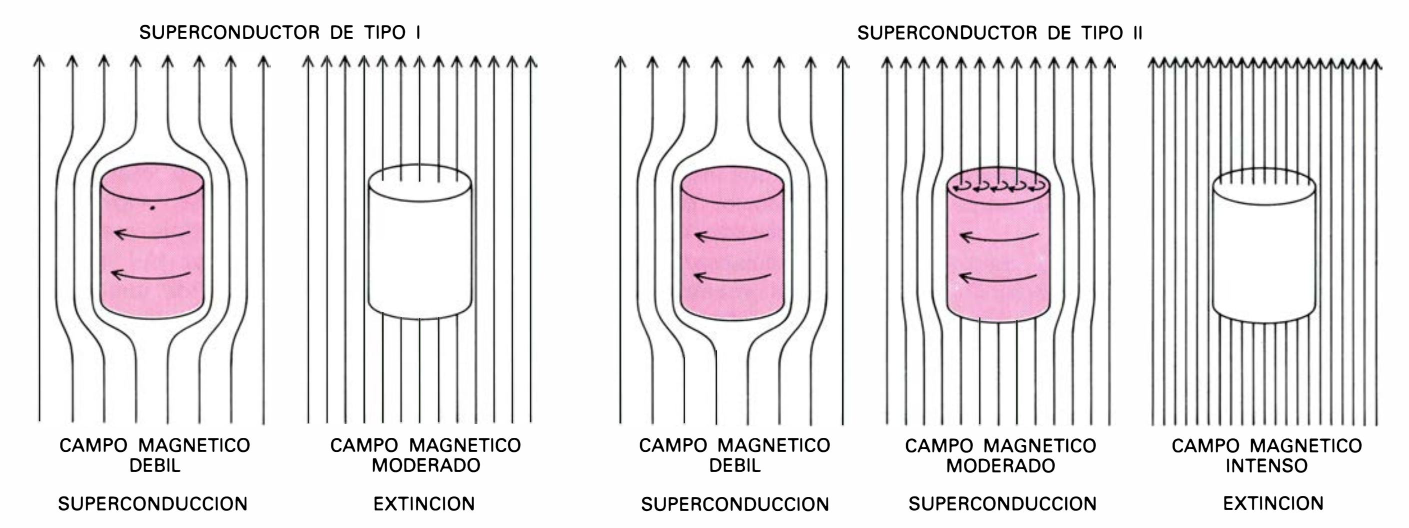
Se precisa de una potencia enorme para excitar los imanes de tales bobinas de solenoide de cobre y hay que bombear grandes volúmenes de agua a través de los arrollamientos para mantenerlos fuera del estado de fusión. Estos métodos tan bastos son adecuados para la investigación, pero no sirven para las aplicaciones diarias del sistema de potencia eléctrica. Aun cuando este tipo de imán pudiera actuar con fiabilidad en un generador, la energía consumida en sus arrollamientos sobrepasaría con creces la ganancia que pudiera obtenerse en el rendimiento resultante del campo magnético más intenso.

Las grandes cantidades de energía disipadas en los arrollamientos de un imán de cobre no se necesitan para mantener el campo magnético. Al contrario, no se precisa de energía alguna para mantener un campo magnético permanente una vez establecido éste. La energía se pierde en la compensación de la resistencia del cobre frente a la circulación de la corriente de excitación. De aquí se sigue que un imán superconductor, que tiene una resistencia nula, puede mantener un campo magnético sin la entrada de energía. La intensidad máxima del campo magnético no viene limitada por los requerimientos de potencia o por la disipación de calor, sino únicamente por las propiedades intrínsecas del material superconductor.



TECNOLOGIA ASOCIADA A LA ENERGIA ELECTRICA. Dicha técnica sólo pudo desarrollarse a medida que se iba disponiendo de métodos para crear los fuertes campos magnéticos requeridos por los motores, generadores y otros aparatos eléctricos. En la tecnología normal, no superconductora, los campos derivan de los electroimanes de cobre e hierro, que poseen una intensidad de campo máximo práctica de unas dos tesla. La superconductividad, aunque descubierta en 1911, no pudo adoptarse en un comienzo en los aparatos de potencia porque los superconductores iniciales, clasificados actualmente como de tipo I, no podían operar en campos magnéticos intensos. El descubrimiento de que algunos superconductores del tipo II (la mayoría aleaciones o compuestos metálicos) podían tolerar campos externos ha franqueado la barrera de las dos tesla. El desarrollo de los superconductores del tipo II, que no sólo soportan fuertes campos magnéticos sino que transportan además una alta densidad de corriente eléctrica, ha suscitado un extenso interés reciente hacia los aparatos de potencia superconductores.

La superconductividad fue descubierta hace 70 años por el investigador holandés Heike Kamerlingh Onnes, quien notó con sorpresa que un hilo de mercurio helado perdía bruscamente toda su resistencia eléctrica a una temperatura inmediatamente inferior a 4,2 grados Kelvin, que es el punto de ebullición del helio. Más tarde, la misma transición abrupta a un estado sin resistencia se descubrió en el plomo a la temperatura de 7,2 grados y en el estaño a la de 3,7 grados. Onnes pensó en seguida en la posibilidad de construir un electroimán de alto campo, y, en 1913, construyó una bobina de plomo para ensayar la idea. Los resultados fueron desconcertantes. Si bien la bobina era superconductora en tanto que la corriente de excitación fuera pequeña, cuando el campo magnético excedía de una intensidad moderada el plomo pasaba siempre al estado resistivo. Experimentos ulteriores mostraron que todos los superconductores metálicos puros presentaban una intensidad de campo crítica que les era propia y que estaba claramente definida, siendo usualmente menor de 0,1 tesla; al llegar a este valor, la superconductividad se extinguía súbitamente.



SUPERCONDUCTORES de los tipos I y II. Se distinguen en razón de su respuesta a un campo magnético. Un campo débil es expulsado por ambas clases de materiales en virtud del blindaje de sobrecorrientes formadas en una capa superficial. En un superconductor de tipo I, las corrientes colapsan cuando el campo aumenta hasta una intensidad moderada, inferior a 0,1 tesla; el campo penetra en el metal y se anula la superconductividad. En un material de tipo II, los cuantos de flujo magnético empiezan a penetrar para un valor moderado de campo, pero están aislados de las regiones superconductoras próximas por sobrecorrientes de torbellino. La última traza de superconductividad desaparece cuando el campo alcanza un nivel más alto.

Las propiedades magnéticas de un superconductor son insólitas incluso para campos inferiores al nivel crítico. Si se aplica un pequeño campo magnético a un superconductor, aquél induce una sobrecorriente permanente en la superficie del metal, que excluye el flujo del campo magnético desde el interior. El campo magnético penetra sólo hasta una capa delgada de la superficie. La longitud hasta la que el campo se extiende dentro del material, denominada profundidad de penetración, suele ser de 10^{-5} centímetros o menor.

En las postrimerías de la década de los 30, se llegó al conocimiento de que la superconductividad provenía de una transición de fase entre los electrones de conducción del metal. A temperatura ambiente, los electrones forman un gas; por debajo de una temperatura crítica de transición, algunos de ellos pasan a una fase de condensación, la cual posee una energía más baja que la del gas. Faltaba todavía una teoría mecánico-cuántica de la condensación que se fundara en las interacciones básicas de los electrones.

Dicha teoría fue formulada en 1957 por John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer, que estaban entonces en la Universidad de Illinois. Su análisis partía de la idea siguiente: quienes transportan la corriente eléctrica en un superconductor no son electrones individuales sino pares de electrones corticales enlazados. Naturalmente, todos los electrones tienen la misma carga eléctrica negativa, por cuya razón tienden de ordinario a repelerse mutuamente, no a unirse entre sí. Sin embargo, en el retículo cristalino de un metal existe una interacción de atracción entre los electrones, que puede ser mediada por la existencia de iones metálicos positivos. Los iones positivos son más pesados que los electrones y se mueven mucho más lentamente; de ahí que se retrase su respuesta ante el paso de un electrón. La persistencia de la respuesta después del paso de un electrón crea una concentración de carga positiva que atrae al segundo electrón, apareándose ambos. La fuerza de atracción indirecta entre los electrones es excesivamente débil, y, a temperatura ambiente, es compensada por su agitación térmica. Pero en un metal con una estructura química y cristalina adecuadas y a temperatura próxima al cero absoluto, los electrones pueden reducir su energía total mediante la condensación en pares. Como todos los pares de electrones poseen necesariamente el mismo momento, el momento de un par no puede modificarse por difusión y, por tanto, no existe resistencia.

La teoría introducida por Bardeen, Cooper y Schrieffer daba cuenta, con buen acierto, de la mayoría de las características básicas del estado de superconducción, energía reducida de los pares de electrones y existencia de un campo magnético crítico incluidas. Pero no abordaba otros aspectos de la superconductividad; verbigracia: las propiedades de las aleaciones superconductoras.

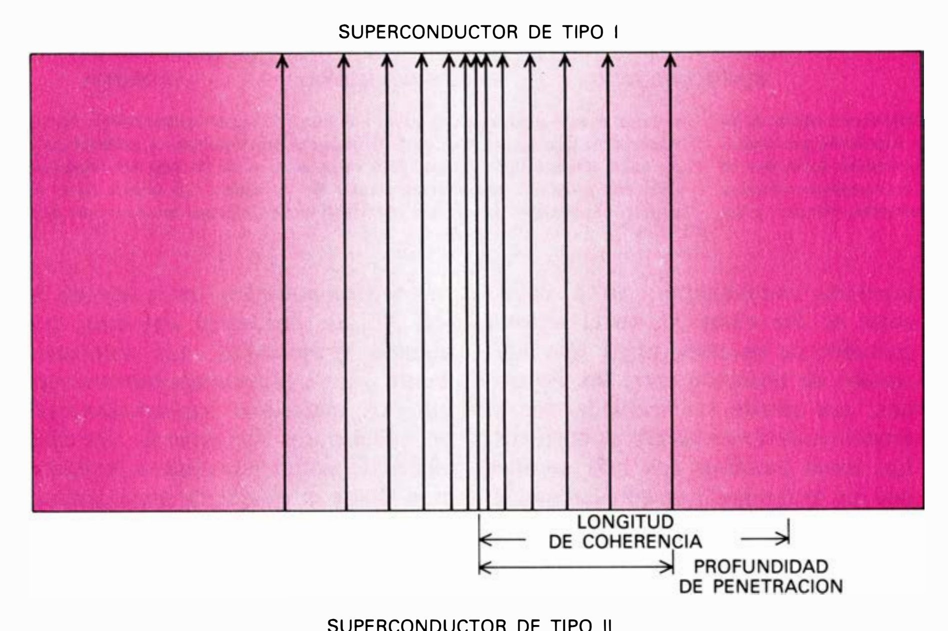
Se afrontó el estudio de las aleaciones superconductoras en la década de los 30. Se descubrió entonces que algunas presentaban una tolerancia frente a los campos magnéticos mayor que los materiales superconductores de metal puro. Por ejemplo, en aleaciones de plomo y de bismuto la transición desde el estado de superconducción hasta el estado completamente normal no se presenta para un único campo crítico bien definido, sino que tiene lugar dentro de una amplia gama de intensidades de campo. Las trazas de superconductividad se mantuvieron hasta valores de dos tesla.

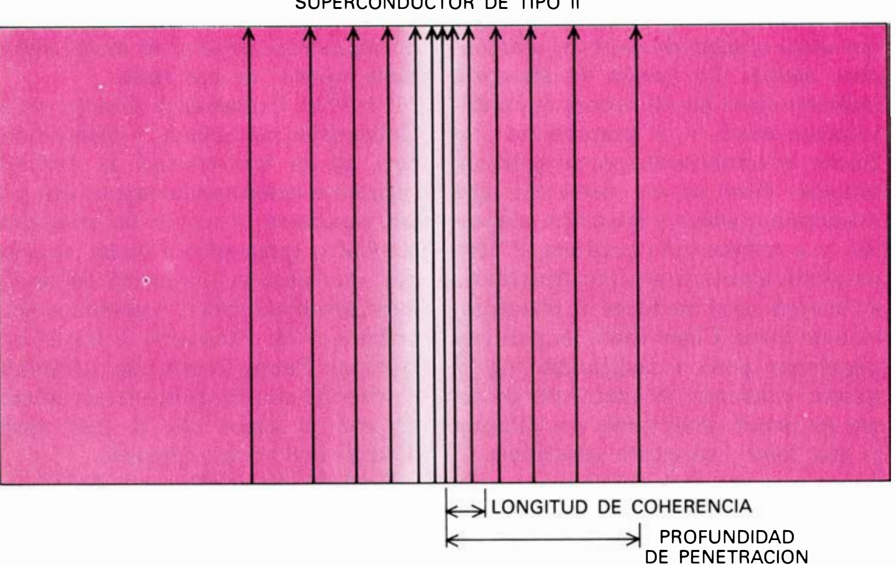
En 1934, Cornelius J. Gorter, de la Universidad de Leiden, y Heinz London, de la Universidad de Oxford, sugirieron independientemente que podía explicarse la región de transición ampliada, característica de las aleaciones, mediante la formación de dominios superconductores y dominios normales que se alternasen a través del material. Puntualizaron que los dominios serían estables si la energía asociada con el límite de la fase entre dominios se volvía negativa.

En 1953, Brian Pippard, de la Universidad de Cambridge, introdujo el concepto de longitud de coherencia en los superconductores; esta longitud es una medida de la gama de las funciones de onda de mecánica cuántica que definen los pares de electrones superconductores. La longitud de coherencia también puede caracterizarse como el espesor mínimo de la interfase entre una región superconductora y otra región normal. Pippard halló que la longitud de coherencia disminuía en las

aleaciones con mayor concentración de soluto. Observó que, si la longitud de coherencia era menor que la profundidad de penetración, se satisfacía la condición de energía de interfase negativa de Gorter y London y resultaría una transición más amplia en un campo magnético.

Estas ideas recibieron una nueva expresión en 1957 en el trabajo del físico ruso A. A. Abrikosov. Distinguía dos categorias de superconductores, designadas por tipo I y tipo II. En un campo magnético muy débil, estas dos clases de materiales actúan de forma muy parecida: ambos expelen completamente el campo. Las diferencias surgen cuando se intensifica el campo aplicado. En los materiales de tipo I, que en su mayor parte son metales puros, la corriente de blindaje de la superficie se colapsa y el flujo magnético entra súbitamente en el material a una intensidad de campo crítica bien definida. Los materiales del tipo II muestran su superconductividad a través de un proceso más gradual. El flujo magnético empieza a penetrar a una intensidad de campo baja (el campo crítico más bajo), pero no se elimina la última traza de superconductividad hasta que se aplica un campo más intenso (el campo crítico superior).





CONFINAMIENTO DE CUANTO DE FLUJO MAGNETICO en un superconductor por sobrecorrientes de torbellino dentro de un estrecho canal de metal resistivo normal. Barrido el núcleo del canal, queda libre de pares de electrones superconductores; pero la densidad de tales pares (*indicada por el color*) aumenta gradualmente hacia el exterior del núcleo y alcanza su valor de equilibrio a una distancia denominada longitud de coherencia. Inversamente, el campo magnético posee su intensidad máxima en el núcleo y disminuye a cero dentro de una distancia denominada profundidad de penetración. Los valores relativos de la longitud de coherencia y de la profundidad de penetración determinan las propiedades magnéticas del material. Si la longitud de coherencia es mayor que la profundidad de penetración, los torbellinos son energéticamente costosos y no se forman; el material es de tipo I y no puede tolerar un campo magnético intenso. (El torbellino hipotético de tipo I mostrado aquí será, por tanto, una estructura inestable, que nunca se observará.) Una longitud de coherencia más pequeña que la profundidad de penetración favorece la formación de torbellinos en la categoría de superconductores de tipo II (*abajo*).

La penetración del flujo magnético en un superconductor del tipo II depende crucialmente de una limitación de la mecánica cuántica: la existencia de un cuanto mínimo de flujo magnético. Por tanto, el campo del interior de un superconductor del tipo II no puede crecer continuamente, sino que debe aumentar por pasos, con un cuanto de flujo cada vez. Abrikosov sugirió que cada cuanto de flujo pasa a través del material dentro de un canal microscópico de metal resistivo normal. Cada canal está rodeado por un pequeño torbellino de sobrecorriente, que actúa protegiendo el material superconductor próximo respecto del campo interno del cuanto de flujo. La función de la corriente en el torbellino es análoga a la de la corriente de blindaje superficial a intensidades de campo más bajas.

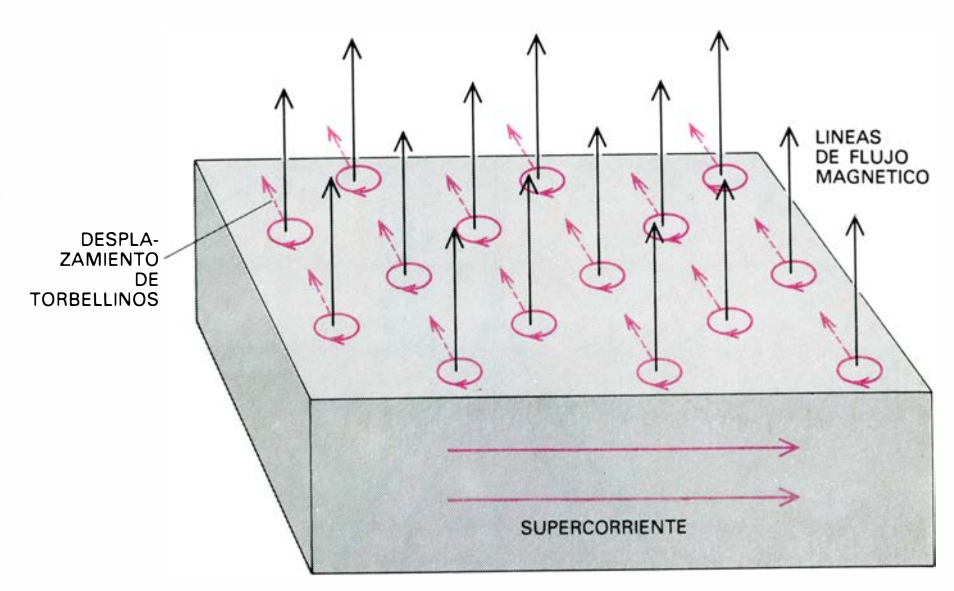
Una sección transversal de tal tipo de torbellino revelaría una región estrecha del núcleo donde el manto magnético alcanza su valor máximo y donde la densidad de los pares de electrones superconductores es mínima. Un observador que se desplazara hacia el exterior desde el núcleo comprobaría que la densidad de los electrones apareados aumentaba y se aproximaba a la densidad de equilibrio característica del material compacto a una distancia de una longitud de coherencia. A la inversa, el campo magnético disminuiría con la distancia referida al núcleo y llegaría a anularse a la distancia de una profundidad de penetración de valor unidad.

El tipo I o el tipo II de un superconductor dado viene determinado por los valores relativos de la longitud de coherencia y de la profundidad de penetración. En los metales puros y en otros materiales pertenecientes al tipo I, la longitud de coherencia es mayor que la profundidad de penetración; no se forman torbellinos. El coste energético invertido en la creación de un torbellino es mayor que el gastado en eliminar completamente el estado de superconducción. En los materiales del tipo II, la longitud de coherencia es menor que la profundidad de penetración. Por tanto, sale energéticamente favorecida la formación de torbellinos.

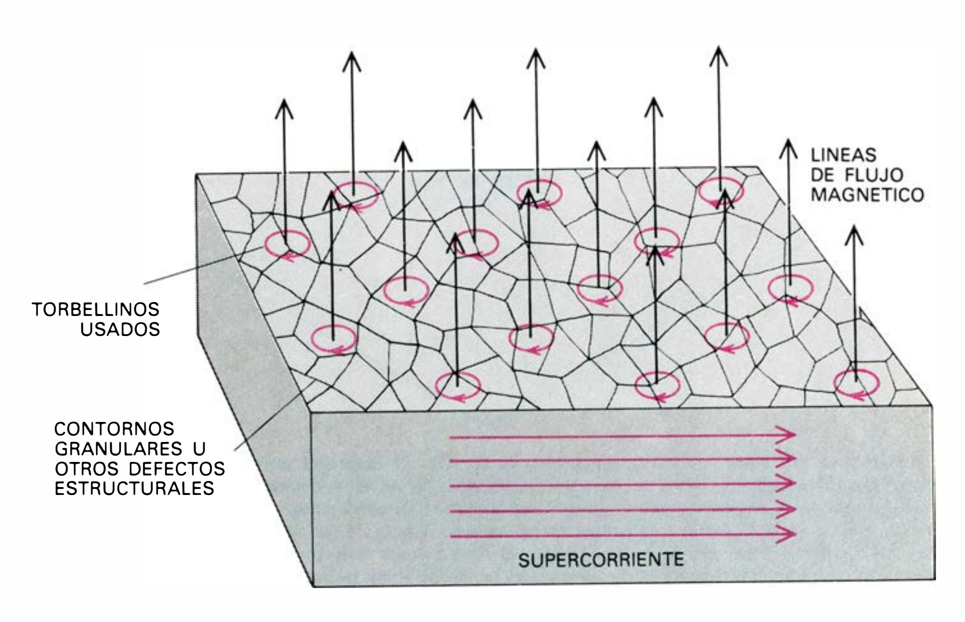
A medida que aumenta el campo magnético aplicado a un superconductor del tipo II, va creciendo el número de cuantos de flujo enfilados a través del material. Forman típicamente una estructura parecida al cristal con una célula unitaria triangular. Entre los canales del torbellino quedan regiones del metal superconductor; de este modo, persiste la superconductividad en el material compacto. Mientras se mantenga un único filete continuo de superconductor, la resistencia medida en la muestra debe ser igual a cero. El superconductor de tipo II sólo se extingue cuando los torbellinos están agrupados tan estrechamente que no puede existir ese paso continuo; tal ocurre cuando se alcanza el campo crítico superior.

Aunque el modelo de Abrikosov aportaba una base teórica que permitía comprender los superconductores de alto campo, no despertó de inmediato ningún interés hacia la tecnología de la superconductividad. La posibilidad de campos críticos extremadamente altos (mayores de dos tesla) no era obvia, por un lado, y además, no se consideraba la cuestión de la densidad de corriente.

El descubrimiento de superconductores útiles desde el punto de vista tecnológico resultó de la búsqueda de nuevos materiales de temperaturas altamente críticas. En ese empeño investigador trabajamos nosotros y Bernd T. Matthias en la Universidad de Chicago y en los Laboratorios Bell. Se ensayó con una gran cantidad de materiales y se prestó particular atención a las aleaciones y a los compuestos metálicos de la serie de transición (los ocho grupos de elementos que vienen a caer en medio de la tabla periódica).



SUPERCONDUCTOR DE TIPO II DE BAJA CORRIENTE CRITICA



SUPERCONDUCTOR DE TIPO II DE ALTA CORRIENTE CRITICA

MOVIMIENTO DE LAS LINEAS DE FLUJO, responsable de la extinción de la superconductividad cuando se fuerza un material del tipo II a transportar una densidad de corriente que excede de un valor crítico. Las líneas de flujo están condicionadas por una fuerza directamente perpendicular a su propio eje y al de la sobrecorriente. Su movimiento puede liberar calor suficiente para extinguir el superconductor. Se alcanza una alta densidad de corriente crítica cuando existen amplios contornos granulares u otros defectos en la estructura cristalina, que ligan las líneas de flujo. Los superconductores de interés son aquellos que poseen, a la vez, un campo magnético y una densidad de corriente altamente críticos.

Descubrimos que un grupo de los compuestos metálicos de transición incluía varios materiales con temperaturas críticas notablemente altas para la iniciación de la superconductividad. Estos materiales se caracterizaban por una estructura cristalina denominada *A*15. El componente típico de la clase era el compuesto niobio-estaño Nb_3Sn, que se convertía en superconductor a los 18 grados Kelvin. Las propiedades magnéticas del Nb_3Sn se investigaron en 1961 por J. Eugene Kunzler, Ernest Buehler, Frank S. L. Hsu y Jack H. Wernick en los Laboratorios Bell. El compuesto superaba en mucho las características de todos los materiales conocidos hasta entonces: el superconductor Nb_3Sn sostenía una densidad de corriente de más de 100.000 ampère por centímetro cuadrado mientras estaba inmerso en un campo magnético de casi nueve tesla. Más tarde, se halló que el campo crítico del Nb_3Sn excedía de 20 tesla.

Investigaciones ulteriores revelaron que la alta tolerancia a los campos magnéticos del Nb_3Sn podía explicarse de acuerdo con el modelo diseñado por Abrikosov. El material era un superconductor extremo del tipo II, es decir, que su longitud de coherencia era mucho más corta que su profundidad de penetración. Hubo que ahondar e insistir en los estudios para poder dar cuenta de la densidad de corriente, altamente crítica, del Nb_3Sn.

Gorter y Philip W. Anderson, de los Laboratorios Bell, aportaron simultáneamente las ideas clave para la solución de este problema. Observaron que la corriente en el superconductor ejercía una fuerza en las líneas de flujo magnético que tendía a empujarlas en ángulo recto con relación a su propio eje y a la dirección del flujo de corriente, a la vez. La fuerza era la misma que

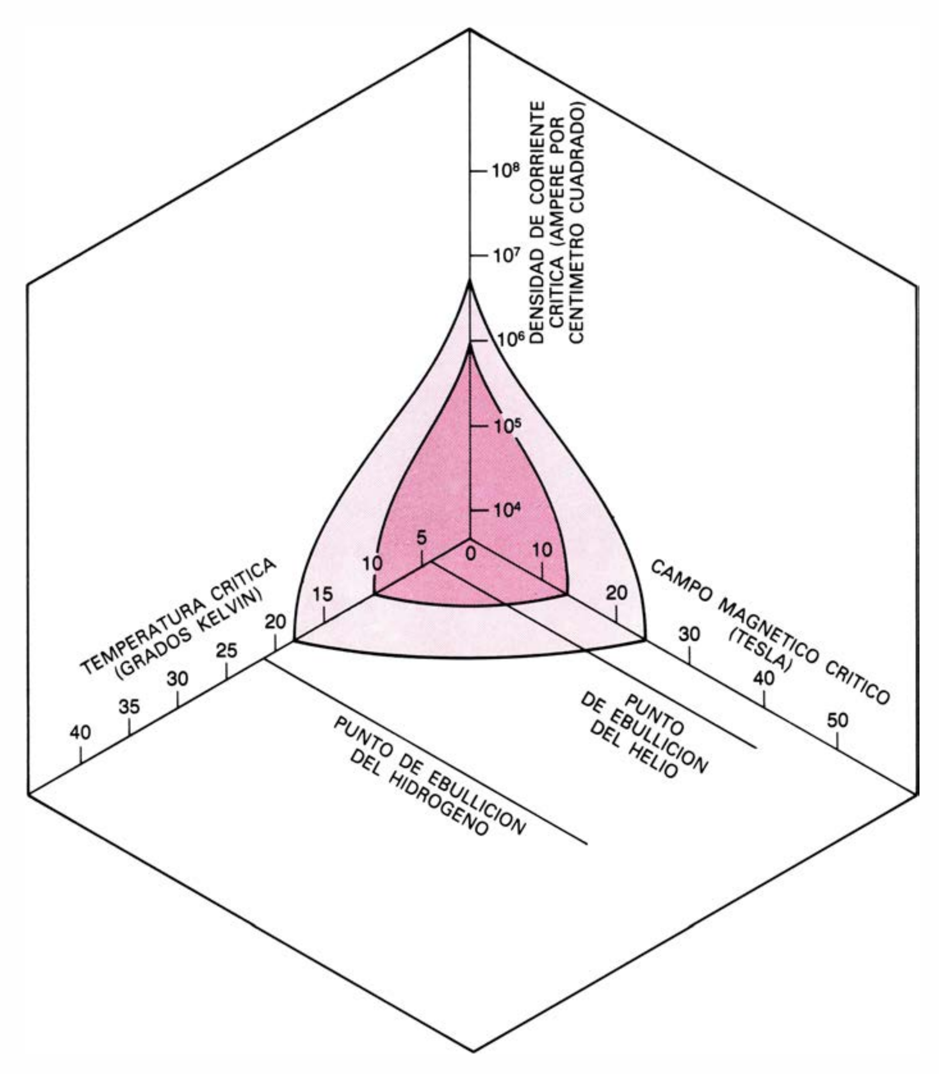


DIAGRAMA DE FASE para dos materiales de tipo II. El diagrama especifica las condiciones de temperatura, densidad de corriente y campo magnético que permiten mantener la superconductividad. En el punto de ebullición del helio, que es la temperatura de servicio más conveniente, la aleación de niobio y titanio debe limitarse a un campo aproximado de 10 tesla y a una densidad de corriente inferior a los 100.000 ampère por centímetro cuadrado. El Nb_3Sn puede trabajar bajo condiciones mucho más extremas. El campo máximo de Nb_3Sn en el punto de ebullición del helio supera el valor de 20 tesla; en un campo de menor intensidad, la densidad de corriente puede acercarse al millón de ampère/cm^2.

daba lugar al movimiento último de un motor eléctrico o de un altavoz. El movimiento de las líneas de flujo bajo la influencia de esta fuerza podía ocasionar un calentamiento local y, por tanto, extinguir la superconductividad.

Gorter y Anderson sugirieron que los torbellinos podían fijarse en los defectos de la estructura cristalina; serían, pues, capaces de resistir la fuerza derivada de la sobreintensidad y sólo se despegarían cuando se excediese de un umbral en la densidad de corriente crítica. Había muchas clases de defectos capaces de fijar los torbellinos; piénsese en las dislocaciones, los contornos granulares, los huecos y grupos de átomos impuros.

La lista de especificaciones de los superconductores de campo y corriente altos reseña materiales que parecen distinguirse principalmente por sus defectos. Suelen ser malos conductores en estado normal resistivo. Estos materiales poseen también una alta densidad de defectos estructurales para fijar torbellinos. En la práctica, los superconductores de interés tecnológico tienen una temperatura crítica por encima de los nueve grados Kelvin, un campo crítico superior mayor de unos ocho tesla y una densidad de corriente crítica que rebasa los 10.000 ampère por centímetro cuadrado.

Desde la década de 1960 se han descubierto varios materiales que satisfacen los criterios exigidos para trabajar con un campo y una intensidad altos. Sin embargo, sólo dos de ellos se han erigido en pilares de tecnología de los imanes superconductores: el Nb_3Sn y la aleación de niobio-titanio $Nb_{40}Ti_{60}$. Ambos materiales poseen propiedades extremas del tipo II con una longitud de coherencia mucho más pequeña que la profundidad de penetración. En las aleaciones de niobio-titanio los torbellinos se fijan por marañas de dislocaciones, que se acumulan durante la operación de estiraje del hilo. En el Nb_3Sn, la fijación parece ocurrir principalmente en los contornos granulares; de este modo, para obtener una densidad de corriente crítica alta es necesario un tamaño granular pequeño. La mayoría de las técnicas para preparar el Nb_3Sn producen pequeños granos.

Ni siquiera con la disponibilidad de materiales adecuados la fabricación de un imán superconductor resulta tarea simple o directa. Si alguna pequeña región del arrollamiento supera la densidad de corriente crítica y, por tanto, se extingue su superconductividad, es necesario que los imanes superconductores prácticos pasen seguros al estado normal. En una bobina de superconductor puro, esa zona se comportaría como una conexión de alta resistencia y se vería sometida inmediatamente a un fuerte calentamiento resistivo. El calor desarrollado extinguiría naturalmente las zonas próximas al superconductor, con lo que aumentarían las zonas normales. De no controlarse ese proceso, las consecuencias pueden ser terribles. El colapso del campo induciría altas tensiones; éstas podrían destruir el aislamiento y dañar permanentemente la estructura.

Un primer paso para evitar semejante fallo catastrófico sería revestir el superconductor de un conductor normal de baja resistencia, con cobre por ejemplo. En el caso de que una región del arrollamiento perdiera su superconductividad, la corriente de excitación se dirigiría hacia el cobre.

El revestimiento de cobre permite que un pequeño imán superconductor pase a salvo hacia el estado resistivo. Pero en un imán de mayor tamaño la energía del campo sería demasiado grande para disiparse en forma de calor por los arrollamientos. A mediados de la década de los sesenta se desarrolló una solución a ese problema, conocida por estabilización criostática. Se aumentó mucho la proporción de cobre en los arrollamientos del superconductor, hasta alcanzar usualmente valores de 20 a uno. Se hizo circular, además, helio de refrigeración directamente sobre la superficie de los arrollamientos, de suerte que pudiera extraerse el calor con rapidez. Con estos medios, todo el

calor desarrollado en una pequeña región resistiva podía eliminarse sin que la temperatura aumentara, con lo que se detenía el crecimiento de la zona normal. Tras un breve intervalo, se restablecía la superconducción.

El mayor inconveniente de la estabilización criostática radica en la alta reducción de la densidad de corriente total en el arrollamiento. En un imán de alto rendimiento, no cabe rebajar mucho con cobre la superficie útil de los arrollamientos superconductores. Para obtener campos más elevados se ha desarrollado una nueva estrategia, orientada a eliminar las causas de la extinción prematura. En el decenio de los sesenta se observó que los imanes superconductores experimentales tendían a extinguirse a densidades de corriente muy inferiores al valor crítico correspondiente al medido en pequeñas muestras del material de arrollamiento. La excitación repetida del imán solía conducir a un mejoramiento gradual, efecto denominado entrenamiento. La extinción prematura se debe a la liberación de energía que tiene lugar en los arrollamientos durante la excitación. Se han identificado dos fuentes de tal liberación de energía: la llamada salto de flujo y el movimiento de los conductores en respuesta a una tensión mecánica.

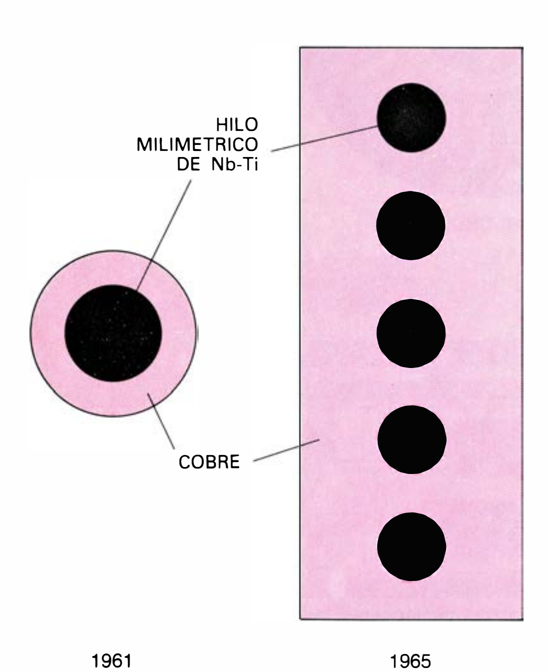
A medida que cambia el campo en un imán superconductor, la gran corriente de excitación del arrollamiento genera corrientes de blindaje inducidas, que circulan en cada cabo superconductor. En condiciones determinadas, las corrientes de blindaje se hacen inestables y pueden colapsar espontáneamente. El salto de flujo resultante, o el movimiento súbito de las líneas de flujo, introduce un "pico" de calor, que puede elevar la temperatura lo suficiente como para extinguir el superconductor.

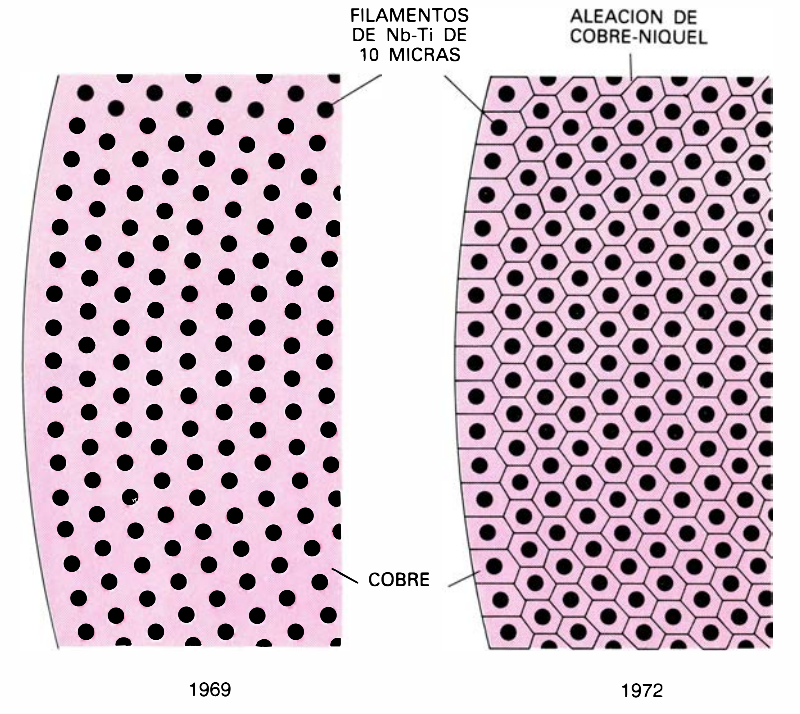
La energía térmica por unidad de volumen liberada por un salto de flujo es proporcional al diámetro del hilo superconductor. De aquí que sea posible reducir el efecto de las inestabilidades del salto de flujo sustituyendo un conductor único por un conjunto de pequeños cabos superconductores embebidos en una matriz de un buen conductor normal, cobre por ejemplo. En las aleaciones de niobio-titanio, el diámetro del filamento se ha reducido desde aproximadamente un milímetro (para los superconductores de un solo cabo) hasta unas 10 micras (para un conjunto de superconductores).

La fabricación de tales conjuntos con multifilamentos es una tecnología compleja. El procedimiento más común consiste en extruir un lingote de cobre en el que están embebidas varias varillas de aleación. Se estira luego el conjunto en hilos, se ensambla en haces y vuelve a estirarse hasta obtener el tamaño final. Se suele torsionar el conductor alrededor de un eje central.

El desarrollo de los conjuntos de multifilamentos no ha eliminado totalmente la fase de ensayo de imanes superconductores. Con el diseño de imanes mayores, el problema ha surgido de nuevo; parece especialmente grave en los imanes que operan a densidades de corriente próximas a la capacidad del material del conductor. La principal causa de este efecto residual del ensayo es probablemente el calentamiento por fricción que resulta del movimiento mecánico de los conductores. Parece como si, al excitar por primera vez el imán, los conductores deban "ponerse en condiciones de funcionar" pasando a nuevas posiciones y liberando picos de calor en el proceso. Aunque fuera deseable evitar tales movimientos mediante fuertes limitaciones mecánicas, es difícil cumplirlo, si se tiene en cuenta que hay que proporcionar, al propio tiempo, un acceso a la superficie del conductor para el paso del helio líquido refrigerante.

Además de los picos térmicos provo-





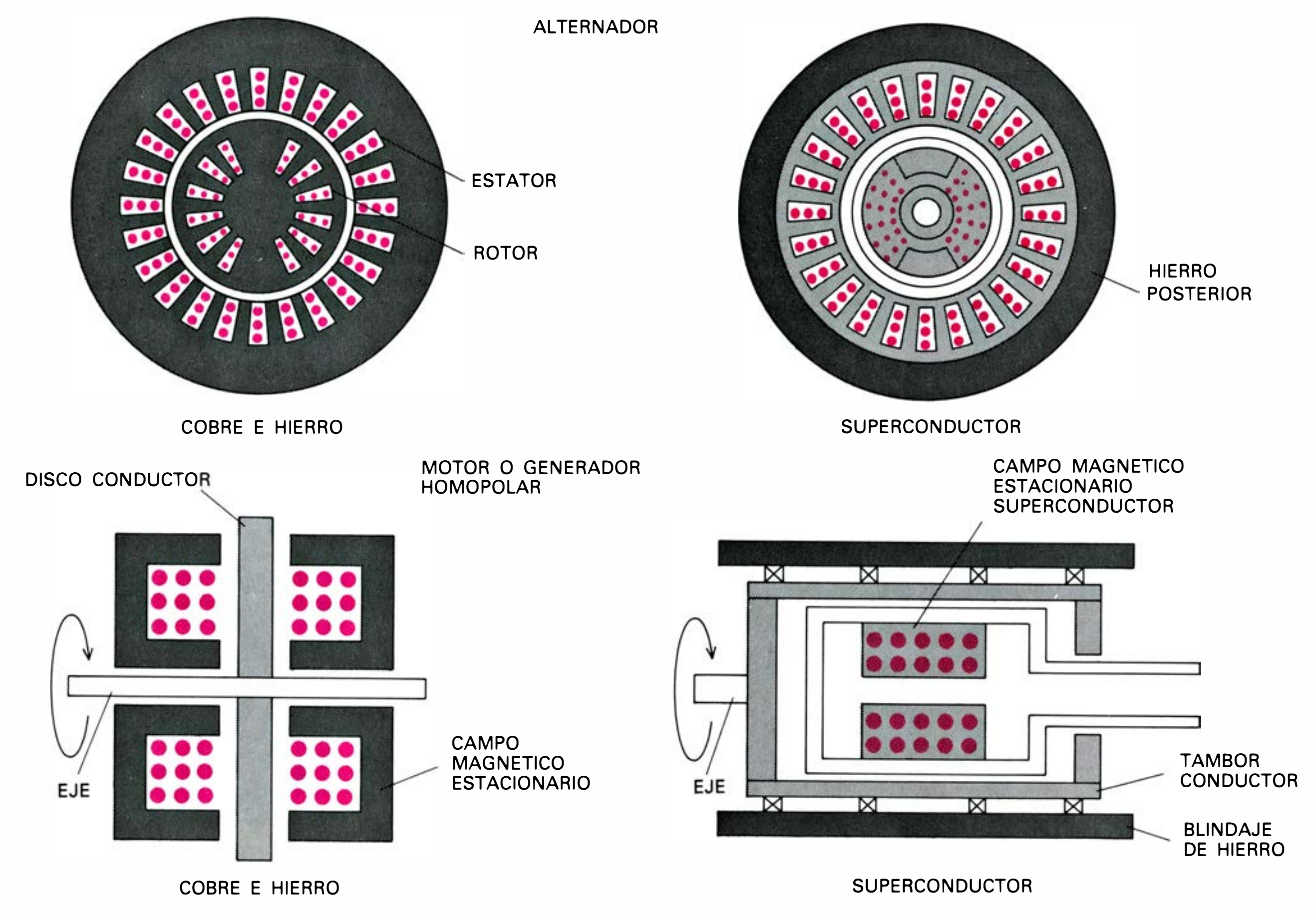
LOS MATERIALES COMPUESTOS FILAMENTARIOS eliminan varias causas de extinción prematura en los superconductores de alta potencia. Se representan cuatro etapas en la evolución de los conductores fabricados con aleaciones de niobio-titanio. En los primeros diseños se fijaba un hilo de niobio-titanio de un milímetro de diámetro a una delgada capa de cobre para absorber la corriente en caso de que el superconductor se extinguiera. Más tarde se aumentó la relación del cobre al superconductor para evitar la propagación de los puntos de calor locales. Causa destacada de los puntos calientes fue el colapso de las corrientes de blindaje en los cabos superconductores. Ambos fenómenos, la incidencia de tales saltos de flujo y la energía que disipaban, podían menguarse fabricando los cabos en un tamaño menor y pudieran así embeberse en cobre filamentos de unas 10 micras de diámetro. Se dio otro paso hacia adelante al aislar cada filamento, situándolo dentro de una célula de cobre protegida por paredes de aleación de cobre-níquel.

cados por los saltos de flujo y por el movimiento del conductor, se genera también calor en el arrollamiento magnético por las corrientes de blindaje, inducidas siempre que cambia el campo interno. La importancia de las corrientes de blindaje está en relación directa con la rapidez con que varía el campo; por cuya razón, el calor que desarrollan recibe la denominación de pérdidas dinámicas. Muchos imanes de investigación de gran tamaño, entre los que cabe citar los empleados en los aceleradores de particulas y en los reactores de fusión nuclear, deben ser alimentados a impulsos en un régimen de todo-nada; el campo, pues, varía rápidamente. De ahí que deban tomarse las medidas necesarias para reducir las pérdidas dinámicas en lo posible. La fabricación de los filamentos en un tamaño menor todavía reduce las pérdidas de la corriente de blindaje en el propio superconductor; la torsión y la transposición de los filamentos en un conjunto reduce las pérdidas causadas por las corrientes parásitas de la matriz de cobre. Las corrientes parásitas pueden reducirse ulteriormente incorporando una barrera resistiva en el cobre; ésta puede formarse a partir de una aleación de cobre-níquel de alta resistencia, aplicada a cada varilla revestida de cobre antes de que los filamentos se empaqueten para las etapas finales del estirado. El material terminado tiene entonces una estructura complicada. Se trata de un haz de filamentos superconductores torsionados y transpuestos, embebido cada uno en cobre y aislado de sus elementos próximos por una pared delgada de cobre-níquel.

No menos importancia reviste una estructura filamentaria fina en los superconductores basados en los compuestos Nb_3Sn y en los derivados *A*15. Sin embargo, por tratarse de materiales de extremada fragilidad, la fabricación resulta todavía más difícil. Los primeros conductores de Nb_3Sn se fabricaron compactando una mezcla de polvos de niobio y de estaño dentro de un tubo de niobio y estirando el tubo para formar una longitud del hilo. El compuesto de Nb_3Sn se fabricó por tratamiento térmico después de que el hilo se bobinara en la armadura del imán, para evitar así un curvado adicional.

En una técnica más reciente se fabrica un compuesto filamentario de metal de niobio puro a partir de una matriz de bronce (una aleación de cobre y de estaño). Estirado el hilo hasta su tamaño final, se calienta dando lugar a que parte del estaño emigre desde el bronce al niobio, donde reacciona para formar Nb_3Sn. El superconductor V_3Ga (un compuesto de vanadio y galio de *A*15) puede fabricarse de modo análogo. Hay en estudio otros varios métodos para fabricar superconductores *A*15 bajo la forma de compuestos finamente divididos.

Quizá, la aplicación más sencilla de la tecnología de los superconductores sea la fabricación de imanes fijos proyectados para generar un campo constante o un campo que sólo cambia muy lentamente. Andando el tiempo, tales imanes pueden encontrar aplicaciones en la industria de energía eléctrica, si bien la mayoría de los fabricados con este propósito se han empleado en el campo de la investigación.



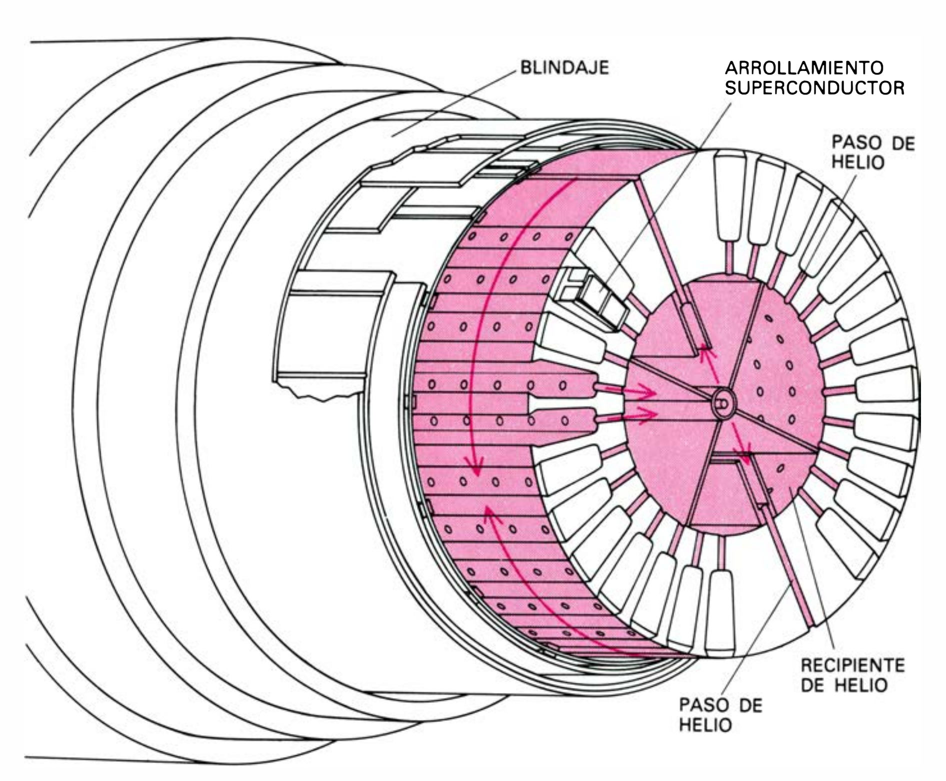
MOTORES Y GENERADORES. Basan su funcionamiento en la interacción de una corriente eléctrica con un campo magnético. Como la potencia de salida es función de la intensidad del campo, pueden esperarse mejoras significativas sustituyendo los imanes de cobre-hierro por imanes superconductores. En un alternador, o generador de corriente alterna, un electroimán excitado por una corriente continua gira dentro de una jaula de bobinas del estator, donde se induce la corriente alterna. Con los materiales actuales, las pérdidas dinámicas impiden la utilización de un estator superconductor, aunque sí cabe el empleo de un rotor superconductor. Un generador de corriente continua o un motor del tipo homopolar consta de un disco o tambor conductor que gira en un campo magnético. Nuevamente, puede elevarse la potencia de salida si el imán excitador pertenece al tipo superconductor.

Un dominio de la ciencia donde los imanes superconductores se han mostrado particularmente útiles ha sido en la física de las partículas elementales. Así, el mayor de todos los imanes superconductores es uno que circunda una cámara de burbuja en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. El imán tiene un volumen de trabajo de unos 80 metros cúbicos y un campo central máximo de 3,5 tesla; la energía almacenada en el campo alcanza los 800 megajoule.

En el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), cerca de Chicago, se están construyendo casi 1000 imanes superconductores para su posterior instalación en un anillo subterráneo de seis kilómetros de circunferencia. Los imanes forman parte de un sincrotrón, donde los protones reciben una aceleración a alta energía al recorrer repetidamente una cámara anular de vacío; los imanes tienen por misión dirigir y enfocar los protones al objeto de que permanezcan en el anillo. Se espera que el acelerador superconductor alcance el doble de la energía máxima de un sincrotrón ya existente en el mismo túnel, equipado con imanes de cobre y de hierro; se reducirá, al propio tiempo, el consumo de energía. Los imanes, que se están devanando con alambre filamentario de niobio-titanio, tendrán un campo de cresta de 4,5 tesla. El campo debe ser uniforme, alcanzando una precisión de unas pocas partes en 10.000. La refrigeración de los imanes exigirá 5000 litros por hora de helio líquido.

Otro anillo de imanes superconductores, mayor aún, se está construyendo en el Brookhaven National Laboratory para un aparato bautizado con el nombre de mujer ISABELLE, donde se almacenarán protones de alta energía en haces contrarrotativos. El diseño de los imanes del ISABELLE difiere del seguido en el proyecto Fermilab, pero sus especificaciones básicas son similares, con un campo máximo de cinco tesla. La necesidad de uniformidad del campo es todavía más estricta: unas pocas partes en 10.000.

La más alta intensidad de campo alcanzada hasta la fecha en un imán superconductor se generó en un aparato mucho más pequeño; fabricado en los Estados Unidos, fue puesto en funcionamiento en el Japón en la investigación de materiales. Alcanzó un campo central máximo de 17,5 tesla en un volumen de trabajo de 70 centímetros cúbicos. Este imán es también uno de los pocos en servicio construido con los compuestos *A*15, en vez de las aleaciones de más fácil fabricación. El arrollamiento consta de una mezcla de Nb_3Sn y V_3Ga.



ALTERNADOR SUPERCONDUCTOR que construirá la compañía Westinghouse en un programa conjunto con el Electric Power Research Institute (EPRI). En el dibujo se muestra la sección transversal del rotor del alternador. Sólo el rotor posee un arrollamiento superconductor; debido a las pérdidas dinámicas, el estator debe fabricarse con cobre e hierro. El rotor está encajado en una matriz de vacío aislante que gira con él. El helio líquido entra a través de un acoplamiento rotativo y es mantenido en un recipiente en la cavidad central. Circula por convección: el helio que ha absorbido calor de los arrollamientos tiende a fluir hacia el centro, desde donde se extrae en fase de gas. Los arrollamientos, que están fabricados con aleación de niobio-titanio, tienen la forma de óvalos bidireccionales. El alternador tendrá una capacidad de potencia de 270 megawatt. Será ensayado en una central energética comercial.

Los imanes superconductores de gran tamaño alimentados por corriente continua tienen un gran número de aplicaciones potenciales en la industria eléctrica. Durante algunos años se ha venido investigando en una aplicación específica: la técnica de generación por magnetohidrodinámica, o técnica MHD. Un sistema MHD puede sustituir la caldera, la turbina y el alternador de un grupo de potencia que queme carbón o fuel-oil; la potencia eléctrica derivaría directamente de la combustión del fuel. En el corazón del generador MHD existe un "canal", donde un plasma a alta temperatura o un gas ionizado es forzado a través de un campo magnético a alta velocidad. El campo desvía los iones positivos y negativos del plasma en direcciones opuestas, lo que da lugar a una diferencia de tensión en un plano perpendicular, a la vez, al campo magnético y a la dirección del flujo de plasma. Los electrodos en contacto con el plasma recogen las cargas separadas y conducen así una corriente hacia el circuito externo. El generador MHD no tiene partes móviles, aparte del propio plasma.

El rendimiento de un canal MHD mejora a medida que el plasma se hace más caliente y se intensifica el campo magnético. Es necesario limitar la temperatura máxima para no dañar la pared del canal; debido a ello, la intensidad de campo adquiere la máxima importancia. A temperaturas viables, un rendimiento aceptable exige un campo de entre cinco y 10 tesla; por tanto, se hace imperiosa una bobina superconductora.

En un proyecto conjunto ruso-norteamericano (actualmente suspendido) se está ensayando un generador prototipo MHD con una potencia de 25 megawatt, en Moscú. El imán del generador se fabricó en el Argonne National Laboratory, fuera de Chicago. Posee una intensidad máxima de campo de cinco tesla y un volumen de trabajo de un metro cúbico; la energía almacenada del campo se eleva a 20 megajoule.

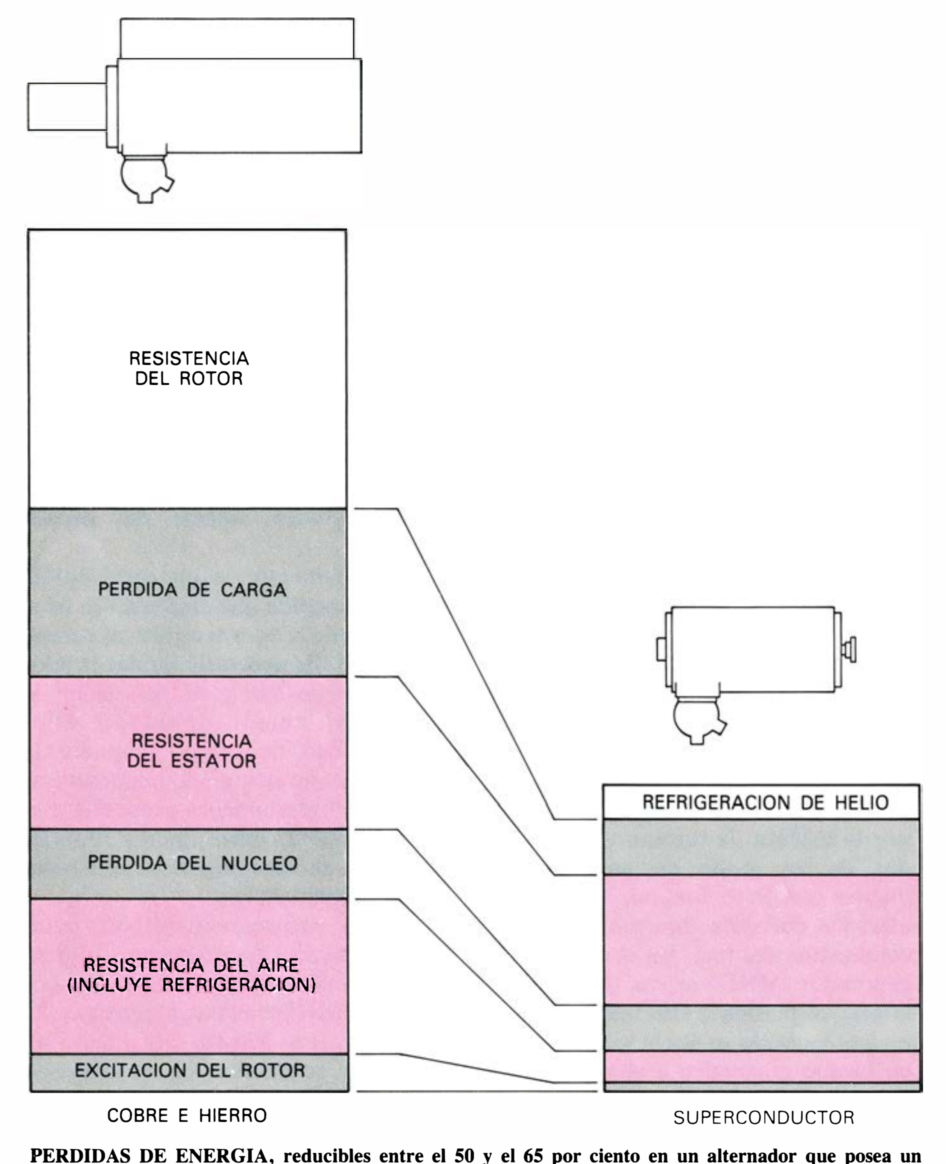
Otro imán MHD, todavía mayor, que pesa unas 400 toneladas está en fase de construcción en Butte, Montana, por la MHD Component Development and Integration. Este programa representa el primer paso hacia una central eléctrica MHD con una capacidad de 600 megawatt. Estudios realizados sugieren que tal tipo de planta requerirá un imán superconductor capaz de alcanzar los seis tesla, con un peso de unas 2000 toneladas.

Es de esperar que la generación de energía por fusión termonuclear se convierta en una realidad y que en el siglo XXI suministre abundante energía en todo el mundo. Para mantener una reacción de fusión hay que confinar un plasma a una densidad suficiente, mientras se le calienta a una temperatura superior al millón de grados. Cualquier contacto con las paredes del material envolvente enfriaría rápidamente el plasma, además de contaminarlo. La investigación centra hoy sus esfuerzos en confinar el plasma en un campo magnético; éste puede disponerse de suerte que las partículas cargadas se desvíen siempre antes de topar con las paredes de la cámara. La intensidad de campo necesaria se encuentra entre ocho a 12 tesla, por cuyo motivo la única alternativa práctica son los bobinados del imán superconductor.

En años recientes, el tipo de reactor de fusión que ha recibido más atención ha sido el tokamak; en él, el campo de confinamiento y la cámara de reacción tienen una forma toroidal [véase "Física y tecnología del reactor de fusión", por Martín Llorens, Alfred Menzell y Miguel Villarrubia, INVESTIGACION Y CIENCIA, pág. 8; diciembre de 1980"]. Acaba de nacer un proyecto de vasto alcance para evaluar las tecnologías magnéticas en los tokamaks. Se construirán seis imanes diferentes por equipos de los Estados Unidos, Europa y el Japón; se montarán después en un gran tanque al vacío en el Oak Ridge National Laboratory en Tennessee. Aunque de diseño distinto, todos los imanes proporcionarán un campo de ocho tesla dentro de un agujero en forma de D de 2,5 por 3,5 metros. El reactor de fusión que rinda en plan industrial requerirá bobinas mayores todavía.

De los seis imanes, cinco se bobinarán con aleación de niobio-titanio, si bien el diseño que presenta la Westinghouse Electric Corporation precisará de superconductores de Nb_3Sn. La fabricación de estructuras complejas que utilicen materiales distintos de metales tan difíciles ha progresado mucho, como da fe el cable especial que construye actualmente Airco Superconductors para la compañía Westinghouse. El cable consta de 486 cabos, separados por canales por donde circulará a presión el helio de refrigeración como fluido supercrítico a una temperatura de 5,2 grados K. (En la fase supercrítica, el gas y el líquido no pueden distinguirse.) Cada cabo posee un delgado recubrimiento exterior de un semiconductor, que sirve de barrera frente a las corrientes parásitas que pueden originarse entre los cabos. Dentro del recubrimiento del semiconductor existe una camisa de cobre puro, cuyo objeto es hacerse cargo de la mayor parte de la corriente si se apaga el superconductor; el cobre queda separado del núcleo del cabo, que es de bronce, por una capa de tantalio que bloquea la difusión de estaño desde el bronce. Embebidos en el núcleo de bronce se encuentran unos 3000 microfilamentos de Nb_3Sn dispuestos en grupos hexagonales de 19. El compuesto de Nb_3Sn se forma in situ por la difusión de estaño desde el bronce hacia los filamentos de niobio puro.

Una alternativa al proyecto tokamak es el reactor de fusión de espejo magnético, en el cual se confina un plasma en un volumen aproximadamente cilíndrico mediante imanes colocados en cada extremo. En el laboratorio Lawrence Livermore de California se está construyendo una gran instalación para pruebas de fusión en espejo. Un par de bobinas superconductoras producirán un campo máximo de 7,7 tesla.



PERDIDAS DE ENERGIA, reducibles entre el 50 y el 65 por ciento en un alternador que posea un arrollamiento de superconductor en el rotor. Se eliminan todas las pérdidas resistivas del rotor y también se logran ahorros de otras clases. El arrollamiento de superconductor precisa de un refrigerador de helio, pero la potencia que consume es mucho menor que la de los ventiladores que refrigeran el rotor de cobre e hierro. El alternador superconductor es también menor y más ligero que otro con bobina de cobre.

APARATO	CONSTRUCTOR	SUPERCONDUCTOR	CAMPO MAXIMO (TESLA)	VOLUMEN DE TRABAJO (METROS CUBICOS)	ENERGIA ALMACENADA (MEGA-JOULE)	POTENCIA DEL SISTEMA (MEGAVOLT-AMPERE)
IMAN DE CAMARA DE BURBUJA	ORGANIZACION EUROPEA PARA LA INVESTIGACION NUCLEAR	Nb-Ti	3,5	80	800	
ACELERADOR DE PARTICULAS (IMANES DE GOBIERNO Y ENFOQUE)	FERMI NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY	Nb-Ti	4,5	0,06	0,5	
ANILLO DE ALMACENAMIENTO DE PARTICULAS (IMANES DE GOBIERNO Y ENFOQUE)	BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY	Nb-Ti	5,0	0,08	0,85	
IMAN DE ALTO CAMPO PARA INVESTIGACION DE MATERIALES	INTERMAGNETICS GENERAL	Nb_3Sn y V_3Ga	17,5	7×10^{-5}	1,7	
IMAN DE ROTOR PARA ALTERNADOR DE ENERGIA ELECTRICA	WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION	Nb-Ti	5,5	4×10^{-2}	1	5
ALTERNADOR DE 60 HERTZ	WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION	Nb-Ti	5,2	0,86	9,2	300
MOTOR Y GENERADOR HOMOPOLARES PARA PROPULSION DE BARCOS	GARRET CORPORATION	Nb-Ti	5,0	0,06	0,46	2,2
MOTOR HOMOPOLAR	GENERAL ELECTRIC COMPANY	Nb-Ti	6,0	0,06	0,9	2,2
ALTERNADOR DE 400 HERTZ PARA AVIACION	GENERAL ELECTRIC COMPANY	Nb-Ti	5,7	0,06	0,8	20
BOBINAS DE ROTOR PARA ALTERNADOR DE AVIACION	WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION	Nb_2Sn	5,7	0,06	0,8	
IMAN PARA GENERADOR MAGNETO-HIDRODINAMICO	ARGONNE NATIONAL LABORATORY	Nb-Ti	5,0	1	20	25
IMAN PARA GENERADOR MAGNETO-HIDRODINAMICO	GENERAL ELECTRIC COMPANY	Nb-Ti	6,0	5	72	183
IMANES A EVALUAR PARA CONFINAMIENTO DE FUSION TERMONUCLEAR	SEIS FABRICANTES INDEPENDIENTES	5 Nb-Ti 1 Nb_3Sn	8,0			
LINEA DE TRANSMISION DE POTENCIA	BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY	Nb_3Sn	0,1			1000

ENTRE LOS SUPERCONDUCTORES de gran tamaño finalizados o en construcción se cuentan algunos que pueden derivar hacia aplicaciones directas en las redes de energía eléctrica. Uno de los primeros será un alternador basado en el rotor superconductor. La fusión termonuclear y la generación de potencia magnetohidrodinámica son proyectos más distantes, pero en ninguno de ellos existe alternativa a la tecnología de los superconductores. Varios imanes operados con fines experimentales han suministrado información para producir sistemas superconductores a gran escala.

El sistema es comparable, en escala, a los imanes tokamak. La energía almacenada por el campo será de 400 megajoule y la masa total de las bobinas superconductoras será de unas 50 toneladas.

En los alternadores de turbina que, hoy por hoy, suministran casi toda la energía eléctrica, la adopción de materiales superconductores tiene una complicación obvia: algunas partes de la máquina giran a alta velocidad, lo que dificulta el suministro de líquido refrigerante. Podría parecer, por tanto, que el camino más fácil fuera instalar primero los superconductores en las bobinas del campo estacionario de un alternador. Sin embargo, los arrollamientos del estator transportan corriente alterna; consiguientemente, el campo magnético debe disminuir hasta cero y restablecerse en sentido opuesto 100 o 120 veces por segundo. En tales condiciones, las pérdidas dinámicas en los actuales superconductores compuestos alcanzarían un nivel intolerable.

El problema de las pérdidas en los imanes de corriente alterna puede resolverse en última instancia mediante ulteriores refinamientos en la fabricación de materiales superconductores. En el ínterin, los superconductores parecen interesar para su aplicación al imán del rotor de un alternador excitado por corriente continua. Aquí, las dificultades principales no son físicas ni eléctricas, sino mecánicas. El imán y el tanque de vacío que lo envuelve deben girar dentro del estator, típicamente a 3600 revoluciones por minuto, y debe introducirse el helio líquido a través de un acoplamiento rotativo.

En los primeros años de la última década, el MIT y la empresa Westinghouse fabricaron pequeños alternadores experimentales con rotores superconductores. Con un campo en el rotor de unos 5,5 tesla, estas máquinas se idearon para desarrollar hasta cinco millones de volt-ampère. Trabajaron en condiciones de circuito abierto y de circuito cerrado, pero no llegaron a funcionar a plena potencia. En la actualidad, la compañía Westinghouse, en un programa conjunto con el Electric Power Research Institute, está proyectando un alternador superconductor de 270 megawatt. Los arrollamientos de niobio-titanio del rotor producirán un campo máximo de 5,2 tesla. El alternador quedará terminado en 1984 y se está preparando su futuro ensayo en una central eléctrica de servicios generales. Si el proyecto tiene éxito, constituirá la primera y la más importante aplicación industrial de la superconductividad.

De la adopción de superconductores en los grandes alternadores cabe esperar varias ventajas. Las pérdidas eléctricas totales se reducirán en un 50 por ciento o más, lo que representará un ahorro de energía significativo a lo largo de la vida útil de la máquina. Aun cuando el coste inicial del alternador superconductor fuera un tanto elevado, el rendimiento eléctrico mejorado representaría una ventaja económica. Sólo parte de los ahorros pueden atribuirse directamente a la eliminación de pérdidas resistivas en los arrollamientos del rotor. Otra economía energética importante tiene que ver con la eliminación de la carga de refrigeración normal del rotor. Aunque se ha de contar con un refrigerador de helio para el rotor superconductor, su consumo de energía es mucho menor que el de los ventiladores necesarios para refrigerar un rotor de bobinado de cobre. Un alternador superconductor será también menor que una máquina de cobre e hierro con la misma capacidad de potencia, lo que deberá reducir los costos de transporte.

Si arrollamos con cobre bobina del estator de un alternador, su diseño viene también influido por la presencia de un rotor superconductor. El campo más intenso del rotor permite eliminar los "dientes" de hierro de la superficie interna del estator; los dientes mejoran ordinariamente el acoplamiento del flujo magnético desde el rotor al estator, pero con campos superiores a dos tesla se saturarán y no serán de utilidad. No están del todo claras las consecuencias de estos cambios, aunque parece que permitirán que las bobinas del estator estén mejor aisladas y que posiblemente se generen tensiones de salida más altas. La propia potencia podrá generarse directamente en la línea de transmisión de tensión, eliminando, por tanto, un transformador y sus pérdidas consiguientes.

Las reducciones en tamaño y en peso factibles gracias a los campos magnéticos más altos de los sistemas superconductores resultan bastante atractivas para los equipos de aviones y de embarcaciones. El señuelo de esas ventajas han inducido al Ejército del Aire estadounidense a desarrollar alternadores superconductores de 400 hertz basados en principios similares a los proyectos de las centrales energéticas.

En los generadores y motores de corriente continua el problema de las pérdidas dinámicas no es crítico. La Marina norteamericana ha ensayado con éxito un motor de corriente continua superconductor de 400 caballos y ha contratado a las compañías General Electric Company y Garrett Corporation para el desarrollo de dos motores de 3000 caballos y de un generador de 3000 caballos con destino a la propulsión eléctrica de los buques. Las máquinas son del tipo homopolar, pero poseen un tambor que rodea el campo magnético en lugar del disco conductor que gira entre los polos de un imán. El tambor es un conductor normal; en cambio, los arrollamientos del imán son superconductores.

Podemos presumir otras aplicaciones de los imanes y bobinas superconductoras en los sistemas de potencia eléctrica. Una posibilidad sugestiva será la del almacenamiento temporal de la energía eléctrica en el campo magnético de una bobina superconductora. Durante los períodos en que se dispone de una capacidad sobrante, la bobina puede extraer potencia del circuito para así generar el campo. Si se cortocircuitara entonces la bobina, la corriente continuaría circulando y el campo se mantendría indefinidamente. Reconectando la bobina a una carga permitiría que la energía se extrajera a medida que el campo colapsara gradualmente. Tales bobinas acumuladoras pueden ser útiles como aparatos de estabilización a corto plazo en los grandes circuitos de potencia y como acumuladores de potencia a largo plazo para nivelación de cargas. El Scientific Laboratory de Los Alamos trabaja en el proyecto de un prototipo de aparato de estabilización para la Bonneville Power Administration. Tendrá una capacidad de 40 megajoule. Y científicos de la Universidad de Wisconsin investigan la acumulación de energía en ciclo diario en grandes bobinas, con destino a varios servicios generales.

La transmisión de potencia eléctrica a través de un medio superconductor parecería más fácil, por lo menos en un punto, con relación a la fabricación de generadores, motores y máquinas análogas. Al no estar bobinado el conductor, el único campo magnético es el interno generado por el paso de la propia corriente. Este campo es típica-

CAMPOS MAGNETICOS MAS INTENSOS que los desarrollados actualmente en los aparatos superconductores en funcionamiento se hallan entre las características de ciertos materiales del tipo II. Sin embargo, no puede recurrirse a tales materiales mientras no se consiga elevar su densidad de corriente crítica y puedan fabricarse en conductores finamente divididos. Los campos magnéticos superiores a las 20 tesla se generan en impulsos; así se midieron los tramos de trazo discontinuo. No se sabe si los superconductores de alto campo pueden transportar corriente para construir imanes.

mente de 0,1 tesla o menor; por consiguiente, se encuentra dentro de las características de la mayoría de los superconductores de tipo II. No obstante, el desarrollo de las líneas de transmisión de superconductores se halla en una etapa de investigación exploratoria, no en el de una práctica de aproximación comercial, como en el caso de imanes y máquinas. La principal razón de ello estriba en que la transmisión por superconducción se hace económica sólo a niveles de potencia muy altos, comprendidos entre 10^9 y 10^{10} watt, cifra que trasciende las actuales necesidades de los servicios generales eléctricos. Las propias tecnologías competitivas, como los cables refrigerados por agua y los conductos rellenos con hexafluoruro de azufre, están avanzando rápidamente en su papel de candidatos para la transmisión de muy alta potencia.

Hay un potencial evidente para obtener grandes beneficios económicos a partir de un mayor rendimiento de la transmisión de energía eléctrica. El interés por un rendimiento a niveles de potencia muy altos crecerá cuando las centrales de energía nuclear y de combustible fósil deban construirse alejadas de los centros urbanos. Parece también factible que se instalarán más líneas de transmisión subterráneas, sobre todo para acarrear potencia hasta las grandes ciudades. El resultado final de la actual competición entre distintas tecnologías de líneas de transmisión está todavía en el alero.

En principio, una línea de transmisión superconductora que transportase una corriente continua invariable operaría a pleno rendimiento; no se registrarían pérdidas, salvo la energía necesaria para refrigerar la línea. Cualquier cambio en la corriente introduce, empero, corrientes parásitas y un desplazamiento de flujo, lo que genera una energía que se disipa en forma de calor. Para una operación confiable, todas las pérdidas que se producen en una línea de transmisión superconductora deben mantenerse por debajo de los 10 microwatt por centímetro cuadrado. Esta exigencia constituye todo un reto en una línea de corriente alterna donde la corriente varía continuamente. Aún trabajando con corriente continua obtenida mediante un convertidor c.a./c.c., un "rizado" residual de la tensión da lugar a variaciones en la corriente del 2 al 3 por ciento.

La línea de transmisión debe cumplir también otros requerimientos. Al trabajar con corriente alterna pueden presentarse sobrecargas momentáneas entre tres y 10 veces la corriente nominal ante una interrupción súbita de la alimentación o de otras perturbaciones en la red; las corrientes de sobrecarga deben circular sin daños por la línea de transmisión. En los sistemas de corriente continua las corrientes transitorias más altas son considerablemente más pequeñas, de quizás el doble de la corriente normal. Cualquier clase de línea de transmisión de potencia que se adopte debe ser también capaz de soportar los 300 grados de variación de temperatura que se presentarán durante la fase de enfriamiento y la consiguiente expansión y contracción térmica.

En Brookhaven se está montando un proyecto de demostración de una línea de transmisión superconductora de 100 metros de largo. La línea transportará una corriente alterna de 60 Hz de 10^9 volt-ampère. Como superconductor se emplea Nb_3Sn, fabricado en cinta plana: hecha a partir de un sustrato de niobio sobre el cual se forman capas de Nb_3Sn, que se revisten luego de cobre o acero inoxidable. La cinta se bobina con dos hélices coaxiales, que transportarán la carga; nuevas hélices aisladas de los campos eléctricos del par coaxial se encargarán de las sobrecargas.

Ya que las aplicaciones a gran escala de la tecnología de la superconducción están próximas a aparecer, se tiende a prestar atención al enfoque de los problemas que todavía permanecen sin resolver. Así, están los problemas concernientes al rendimiento y a la confiabilidad de los sistemas de refrigeración. La mayoría de los licuefactores de helio se han proyectado para su uso en pruebas de ensayo; la experimentación en los sistemas requeridos para operar de modo continuo es muy pobre. El propio avituallamiento de helio resulta incierto. La fuente más concentrada del elemento se halla subterránea en un puñado de campos de interés, en la zona centromeridional de los Estados Unidos, donde ha existido desde tiempos prehistóricos como componente diluido del gas natural. Se le deja ahora escapar a la atmósfera a medida que el gas entra en combustión. Esta pérdida de fuentes futuras es lamentable. Cabe presumir que, en 1990, se habrán agotado las fuentes más concentradas. Años atrás, el helio se separaba del gas natural antes de quemarlo; luego volvía a su almacenamiento subterráneo. La cantidad de helio almacenada es probablemente adecuada para los imanes de investigación y para las máquinas superconductoras, si se recurre a métodos de conservación. Pero si se adoptan la fusión nuclear de confinamiento magnético y los sistemas de transmisión superconductora de potencia, no valdría ya el suministro de helio a bajo coste. Habría que extraerlo entonces de la atmósfera a un costo de energía muy alto.

El empleo de hidrógeno líquido como refrigerante ofrecerá ventajas importantes sobre el helio; entre ellas, su disponibilidad, coste y rendimiento termodinámico. Lo que falta es un superconductor con un campo y una corriente crítica adecuados para operar en hidrógeno líquido. Cada año se están descubriendo nuevos superconductores; algunos compuestos de *A*15 poseen propiedades próximas a las requeridas. Está claramente justificada una investigación continua de los superconductores para altas temperaturas.

En los Estados Unidos, la gran mayoría de los imanes y de otros aparatos superconductores se han fabricado con las aleaciones de niobio-titanio. Se ha adquirido mucha experiencia con estos materiales y se conocen sus propiedades. Desde nuestro punto de vista, no se ha prestado suficiente atención a la ingeniería de los imanes con arrollamiento de Nb_3Sn y a la de los otros materiales *A*15. Si bien las propiedades mecánicas de estos componentes están lejos de ser las óptimas, los superconductores *A*15 poseen un gran potencial para obtener un mayor rendimiento eléctrico. A cualquier temperatura poseen el campo crítico y la densidad de corriente crítica más altos, así como un mayor margen térmico: el aumento de temperatura tolerable antes de que se extinga el superconductor.

Por último, todas las aplicaciones prácticas que se han intentado de la superconductividad han quedado confinadas a los campos magnéticos inferiores a 12 tesla. Sin embargo, se conocen materiales del tipo II que retienen su superconductividad hasta valores de 50 tesla. Hay motivos para empeñarse en alcanzar estos campos más altos: siempre que se extiende el campo de trabajo de una propiedad fundamental, resulta muy probable que avancen nuestros conocimientos. No se sabe todavía si los superconductores de muy alto campo pueden transportar corriente suficiente para la construcción de los imanes, pero vale la pena ponerse a investigarlo.

El poblamiento del Pacífico

Comenzó hace 40.000 años con los primeros viajes oceánicos. De cómo Melanesia, Micronesia y Polinesia fueron colonizadas más tarde tenemos pruebas lingüísticas, genéticas y arqueológicas

P. S. Bellwood

El poblamiento del Pacífico ha sido la mayor hazaña de la historia humana en el campo de la colonización marítima. Si empezamos por el principio, y decidimos seguir todos los movimientos de sus principales actores, la relación abarca quizá dos millones de años en términos de tiempo y se extiende más allá del Pacífico propiamente dicho, hasta Madagascar, por el oeste, y hasta la China continental por encima del Trópico de Cáncer, por el norte. Su escenario principal, no obstante, lo forman las islas del sudeste de Asia, el subcontinente de Australia con sus islas vecinas y los grandes trechos de océano de lo que hoy se llaman Melanesia, Micronesia y Polinesia. Su primera fase marítima estaba en marcha hace 40.000 años. Ya en aquel entonces ciertos cazadores-recolectores habían conseguido cruzar un mínimo de 70 kilómetros de mar abierto para colonizar Australia y Nueva Guinea.

Mucho antes de que la zona fuese conocida de los europeos, estaba colonizada por diversas poblaciones que han mantenido sus diferencias hasta el día de hoy. Es imposible explicar esta diversidad a partir, simplemente, de los módulos físicos, lingüísticos y culturales de hoy; de ahí proviene la confusión de hipótesis que han proliferado hasta fecha reciente. Los adelantos de la arqueología, de la antropología física y de la lingüística comparada, especialmente a lo largo de los tres decenios últimos, permiten hacer un nuevo balance del problema. Esta visión moderna es lo que voy a presentar aquí. En cierta medida refleja mis propios puntos de vista, no compartidos por todos los especialistas. Se trata, sin embargo, de una visión simple y lógica, susceptible de ser sometida a revisión constante conforme salgan a luz nuevos elementos de juicio.

Para empezar, contemplemos la geografía del escenario principal. Con excepción de Nueva Zelanda y de la mitad meridional de Australia, es un área tropical. Por el oeste, las grandes islas de Borneo, Sumatra y Java forman un grupo en la somera plataforma de Sonda. En épocas de bajo nivel marino, durante las grandes glaciaciones continentales del Pleistoceno, estas islas no sólo estaban unidas entre sí, sino también conectadas con el continente de Asia, formando así una masa de tierra aún mayor que se ha denominado tierra de Sonda. La frontera oriental de la tierra de Sonda está delimitada por la divisoria biogeográfica llamada línea de Huxley, una variante de la más conocida línea de Wallace.

La flora y la fauna a ambos lados de esta frontera difieren considerablemente unas de otras. Al este, en las áreas biogeográficas de las Filipinas y de Indonesia oriental, la vida de las plantas y de los animales es menos diversa y cosmopolita que en la tierra de Sonda. En realidad, Celebes (Sulawesi) y las islas menores de Sonda, en la Indonesia oriental, no han estado con seguridad unidas a la tierra de Sonda desde por lo menos los tiempos del Pleistoceno inferior, hace más de un millón de años. Lo mismo se puede decir de las Filipinas.

Al este de dicha zona, se encuentran Australia y Nueva Guinea, enlazadas por la somera plataforma de Sahul, que también estaba en seco en tiempos de la regresión marina del Pleistoceno. Aquí la fauna de los mamíferos comprende dos formas primitivas –monotremas y marsupiales– que han estado evolucionando en un marco de aislamiento, dentro de la tierra de Sahul, desde que el deslizamiento de los continentes separó esta zona de la Antártida hace más de 50 millones de años, en tiempos del Eoceno. Es cierto que algunos marsupiales consiguieron alcanzar Indonesia oriental antes quizá de que el hombre llegase a ella por primera vez. Es también cierto que mamíferos evolucionados, como las ratas y los murciélagos, llegaron a Australia y a Nueva Guinea desde Asia. Sin embargo, las diferencias biogeográficas básicas existentes entre la tierra de Sahul y sus vecinos suponen para la primera un alto grado de aislamiento. Los profundos mares de Indonesia oriental probablemente no se han cruzado nunca.

Al este de Nueva Guinea se extiende Oceanía, primero las grandes y tupidas islas "negras" de Melanesia, y después los mundos insulares, cada vez más fragmentados, de Micronesia (literalmente "islas pequeñas") y Polinesia (o sea, "muchas islas"), cruzada ya la línea de la andesita (la andesita, una roca volcánica, es característica del gran arco litoral del vulcanismo activo que rodea el borde de la cuenca del Pacífico). Las islas situadas al oeste de la línea son grandes y geológicamente complejas; presentan rasgos tales como rocas sedimentarias y valles fluviales maduros. Más allá de Fidji (y de Nueva Zelanda, mucho más al sur) estos rasgos no son conocidos: las islas de Micronesia y Polinesia son formaciones volcánicas pequeñas, dentadas, o atolones de coral levantados sobre montañas sumergidas hace tiempo. Muchas de estas islas están ordenadas en cadenas. Sin embargo tienden a ser pequeñas, aisladas y depauperadas en su flora y fauna. Para poner un ejemplo:

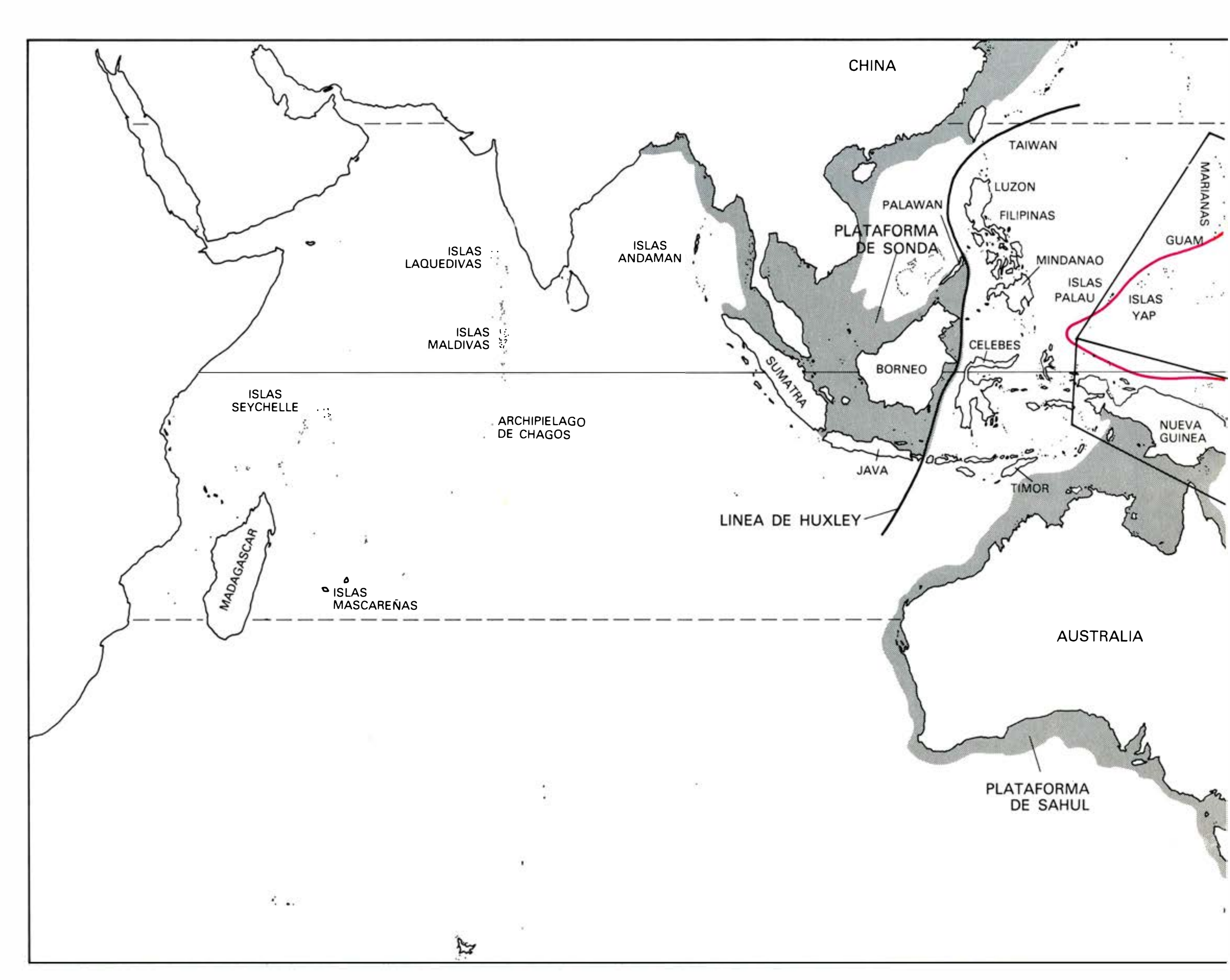
CANOAS DOBLES, con un considerable espacio para pasajeros y carga y a menudo con cabinas para guarecerse, aún se construían en Polinesia en la época de los primeros contactos con los europeos. La embarcación superior, de las dos de la página opuesta, está reconstruida a partir de un apunte realizado por William Hodges cuando el capitán James Cook visitó Tonga en su segundo viaje (1773-74). La inferior, que muestra el transporte del jefe principal de la isla de Hawai en la visita de Cook a las islas Sandwich, es más pequeña; a pesar de ello, podía soportar hasta 50 pasajeros, además de la tripulación.

el desarrollo de las complejas sociedades con que se encontró el capitán James Cook en el siglo XVIII exigió de los inmigrantes que colonizaron Polinesia que llevasen consigo, en su emigración hacia el este, todos sus animales domésticos y las principales plantas alimenticias.

En un momento dado, hace entre uno y dos millones de años, el hombre entró por primera vez en el confín occidental de esta inmensa zona vacía. Los inmigrantes eran poblaciones de *Homo erectus;* sus restos se han hallado en Java central y oriental en formaciones geológicas del Pleistoceno inferior y medio. Recientemente se han descubierto en formaciones asociadas unos cuantos útiles de piedra sencillos. Hasta ahora no se tienen pruebas de la frecuente afirmación de que estos mismos representantes primitivos del hombre llegasen tanto a las Filipinas como a Indonesia oriental. La documentación faunística indica que muy posiblemente Celebes (Sulawesi) estuvo enlazada con Borneo por un istmo de tierra en tiempos del Pleistoceno inferior, pero hasta ahora no hay prueba segura de que el *Homo erectus* se aprovechase de ello para emigrar más al este.

Los vestigios fósiles más recientes de *Homo erectus* en la tierra de Sonda pueden remontarse a unos 300.000 años atrás. Pero nuestra información no comienza prácticamente hasta hace unos 40.000 años. En aquel entonces, poblaciones de cazadores-recolectores que debían de hallarse en estado floreciente en Indonesia, consiguieron de algún modo atravesar las aguas profundas para colonizar Australia y Nueva Guinea, vacías ambas. Tal vez su entrada coincidiese con uno de los períodos de los niveles más bajos del mar en el Pleistoceno, que ahora sabemos ocurrieron hace entre unos 55.000 y unos 35.000 años. Aún así, los emigrantes tenían un mínimo de 70 kilómetros de mar abierto que cruzar; por tanto, su aspiración al título de primeros exploradores oceánicos parece incuestionable.

En lo físico, esta gente era la antepasada directa de los australoides modernos. De sus propios antepasados se puede presumir que incluían una combinación de aportes genéticos del sudeste del Asia continental y de la anterior población de *Homo erectus* de la tierra de Sonda. La documentación arqueológica más clara de su llegada



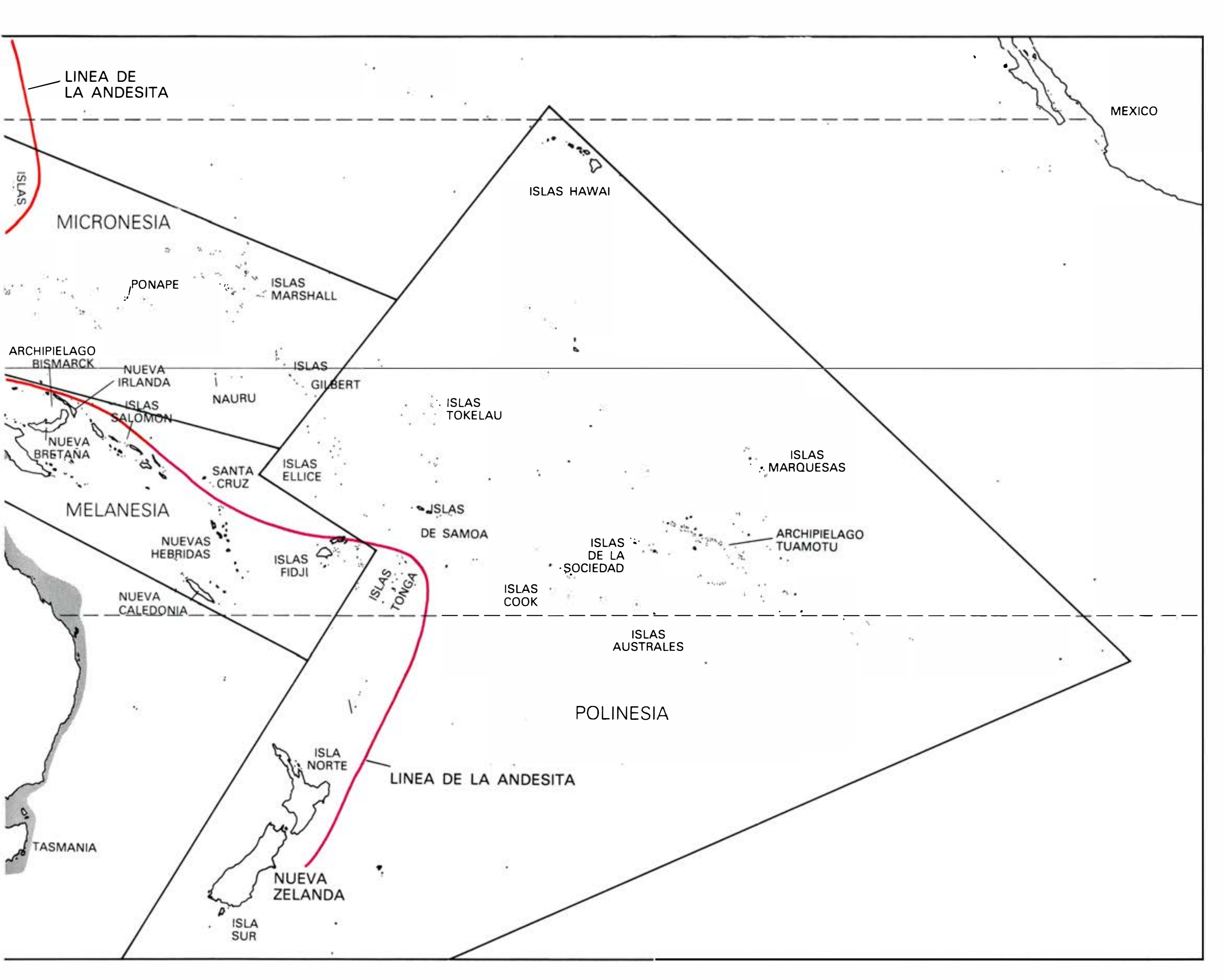
ESCENARIO OCEANICO de la expansión marítima prehistórica, limitado al oeste por el continente de Asia oriental y sudoriental y las islas que estaban unidas al continente en las épocas de bajo nivel marino durante las máximas glaciales del Pleistoceno, cuando la plataforma de Sonda era tierra firme. La línea de Huxley, una variante de la más conocida línea de Wallace, señala el límite entre la rica zona biogeográfica de la tierra de Sonda y las comarcas insulares más orientales, bastante pobres. La ocupación humana de Sonda tal vez comenzase hace dos millones de años; está atestiguada por restos fósiles de

proviene de yacimientos como el lago Mungo, en el oeste de Nueva Gales del Sur, en Australia, y de Kosipe, en las tierras altas de los papúas de Nueva Guinea; los yacimientos datan de hace entre 35.000 y 25.000 años.

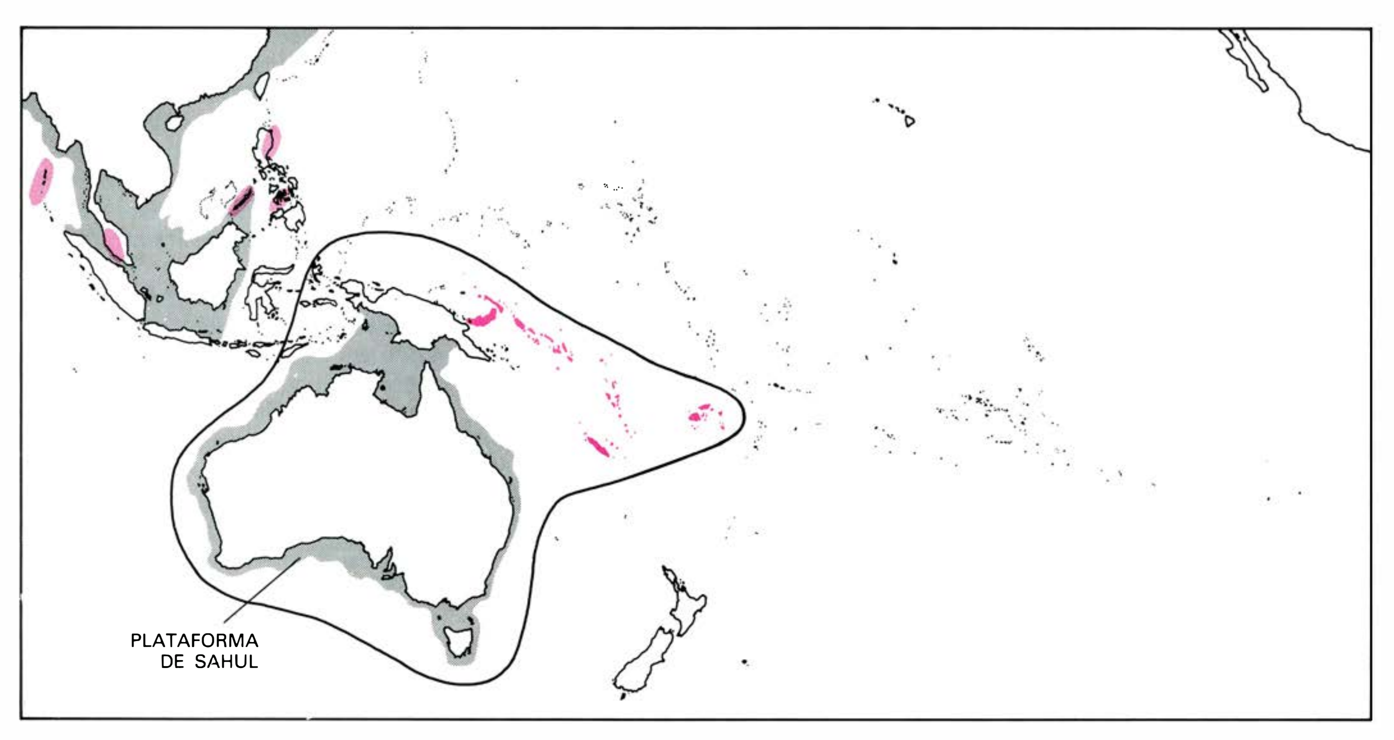
La importancia de esta primera colonización marítima de la prehistoria humana ha de ser evaluada a la luz de actividades similares en otros lugares del mundo. Por ejemplo, algunas islas mayores del Mediterráneo como Creta y Chipre no parecen haber sido colonizadas antes de tiempos neolíticos, hace unos 8000 años, y eso que Chipre se encuentra a unos 80 kilómetros de la costa. Algo de tránsito de isla en isla, a fin de procurarse obsidiana, se practicó en el Mediterráneo oriental antes de aquellas fechas, en tiempos mesolíticos, pero sin que de ello se derivase una colonización.

¿Dónde se encuentran las poblaciones australoides contemporáneas? Los aborígenes de Australia y los montañeses de Nueva Guinea son los representantes básicos del grupo. Los llamados "negritos" de Malaya y las Filipinas son casi con seguridad parientes australoides, y las bolsas aisladas de pueblos similares en las islas de Andaman, al norte de Sumatra, pueden serlo también. Asimismo, las gentes de Melanesia resultan ser básicamente australoides, pero delatan una complejidad genética derivada de penetraciones polinésicas y micronésicas, tanto antiguas como recientes. Las dos últimas poblaciones tienen afinidades mongoloides.

En relación con esto, algunos antropólogos físicos se muestran insatisfechos cuando se aplica el término mongoloide a la población de Polinesia; y es cierto que los polinesios no presentan el aspecto clásico mongoloide de Asia oriental. A decir verdad, muchos polinesios y no pocos pueblos de Indonesia meridional y oriental muestran un alto grado de herencia genética australoide. Esta, naturalmente, era de esperar, dado el anterior predominio australoide en las islas del sudeste de Asia. A mi modo de ver, los indonesios, filipinos, micronesios y polinesios deben su ascendencia a complejos esquemas de migración y flujo genético, generados en última instancia en el continente de Asia oriental, posiblemente al norte de los trópicos. En el transcurso de los últimos 6000 años, estas poblaciones de ascendencia mongoloide han llegado a dominar el sudeste insular de Asia y



***Homo erectus* descubiertos en Java central y oriental. La línea de la andesita (*color*), llamada así por referencia a una característica roca volcánica, separa las islas occidentales y meridionales del Pacífico, complejas desde el punto de vista geológico, de las islas de Oceanía, más pequeñas, volcánicas y de coral.** **Procedentes de la China meridional, aunque no se conocen con seguridad los puntos de partida, navegantes austronésicos ocuparon Taiwan, primero, enfilando después las Filipinas, Sonda e Indonesia oriental. Llegaron en sus viajes hasta Madagascar, por el oeste, y a la isla de Pascua, por el este.**



PRIMEROS VIAJES OCEANICOS, de hace tal vez 40.000 años. Llevaron a los antepasados de los australoides actuales desde Sonda a Australia y a Nueva Guinea, que quizá formasen entonces un todo continental llamado tierra de Sahul. Los "negritos" de las Filipinas, Malasia y Andamán (*color claro*) son parientes australoides. También lo son los melanesios (*color oscuro*) que colonizaron las islas al este de Fidji hace por lo menos 3500 años.

han pasado a colonizar las áreas vacías de Micronesia y Polinesia. Al tema de por qué las poblaciones mongoloides produjeron un impacto genético tan escaso en las poblaciones de Melanesia volveré más adelante.

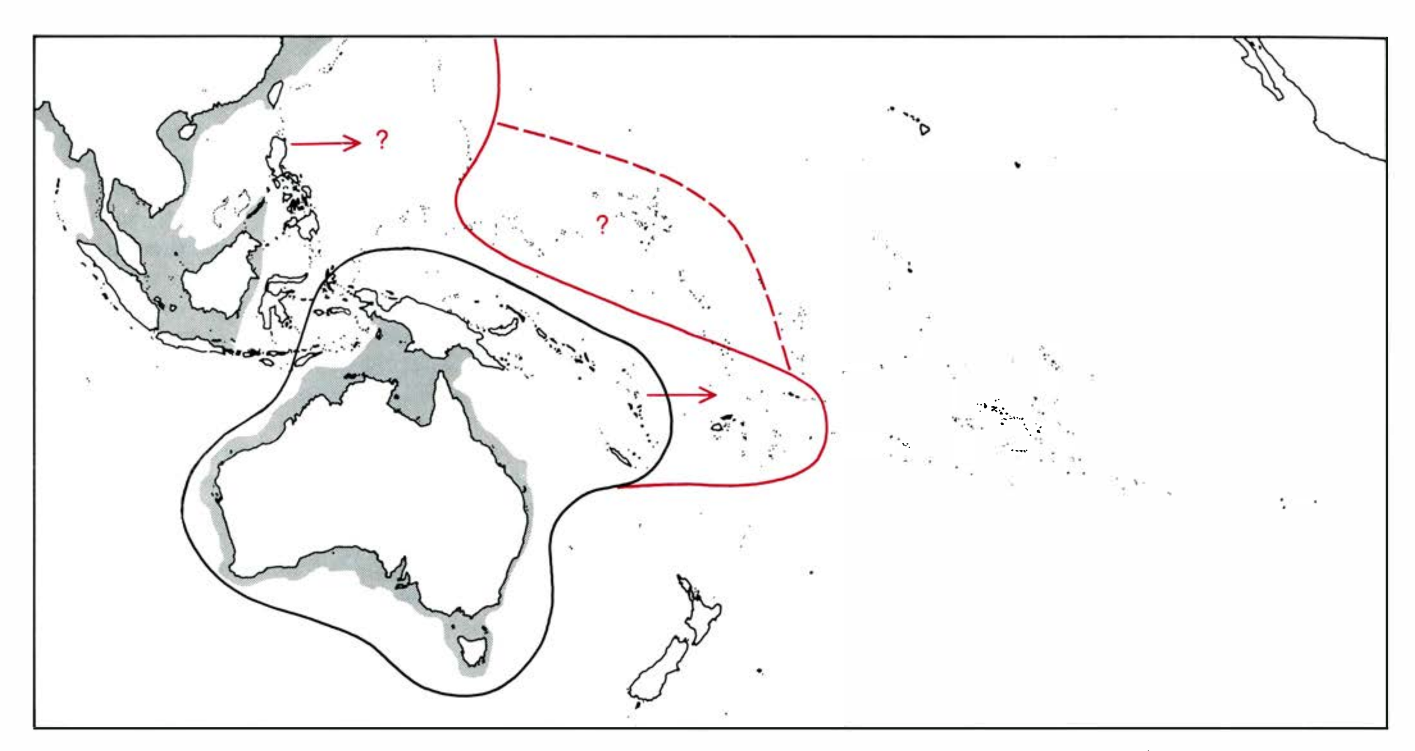
Habiendo llegado al sexto milenio anterior a la época actual, entramos en la fase de la colonización del Pacífico que ha sido el objetivo de mis propias investigaciones durante un decenio. En esta fase, todas las áreas del Pacífico (salvo Australia, la mayor parte de Nueva Guinea y quizás algunas islas adyacentes de Melanesia) fueron colonizadas por gentes que vivían a base de la horticultura fundamentalmente y que hablaban lenguas emparentadas dentro de una gran y única familia: la austronesia (conocida antes como familia malayo-polinésica). Dejando a un lado, de momento, la adelantada cultura material de estos pueblos, la situación lingüística de la zona es aproximadamente como sigue.

Por la razón que sea, Australia permaneció totalmente al margen de la expansión de los austronesio-parlantes por el Pacífico, con el resultado de que en el subcontinente la población aborigen sólo habla lenguas no emparentadas con esta familia. Esto es aplicable también a la mayor parte de Nueva Guinea, donde las muchas lenguas habladas pertenecen a la agrupación antigua y altamente diversificada del papúa. Otras lenguas papúas se encuentran en partes de las islas Molucas, vecinas de Nueva Guinea, y en las islas de Melanesia igualmente adyacentes. Las pruebas arqueológicas y lingüísticas indican que las poblaciones de lengua papúa colonizaron las islas melanésicas de Nueva Bretaña y Nueva Irlanda (y quizá las islas Salomón) no después de hace 6000 años y quizá mucho antes. La colonización de las islas del Pacífico más allá de las Salomón, sin embargo, fue una realización exclusiva de los austronesio-parlantes y comenzó evidentemente hace unos 5000 años.

La mayoría de los lingüistas actuales hace remontar el antepasado más primitivo que se conoce de la familia de lenguas austronésicas, el llamado proto-austronesio, a la isla de Formosa (Taiwan), donde una sola lengua de ese tipo (o un grupo de lenguas emparentadas) se hablaba probablemente hace unos 6000 años. La ascendencia de la familia austronésica con anterioridad a ese estadio es difícil de señalar. Hoy en día no se hablan lenguas austronésicas en la costa de China meridional contigua a Formosa, pero es posible que haya una relación entre el austronésico y la familia Thai de lenguas del continente.

Cuando los lingüistas reconstruyen el vocabulario proto-austronésico pueden hacer ciertas deducciones acerca de la cultura material de sus hablantes. Así, por ejemplo, parece que cultivaban arroz y mijo y quizá también ñame, taro y caña de azúcar. Entre sus animales domésticos había cerdos, perros y quizá gallinas. Muy en los comienzos de la expansión de los austronesio-parlantes por las islas del sur, una serie de cultivos puramente tropicales se sumaron a este inventario: el árbol del pan, la banana, el sagú y probablemente el cocotero.

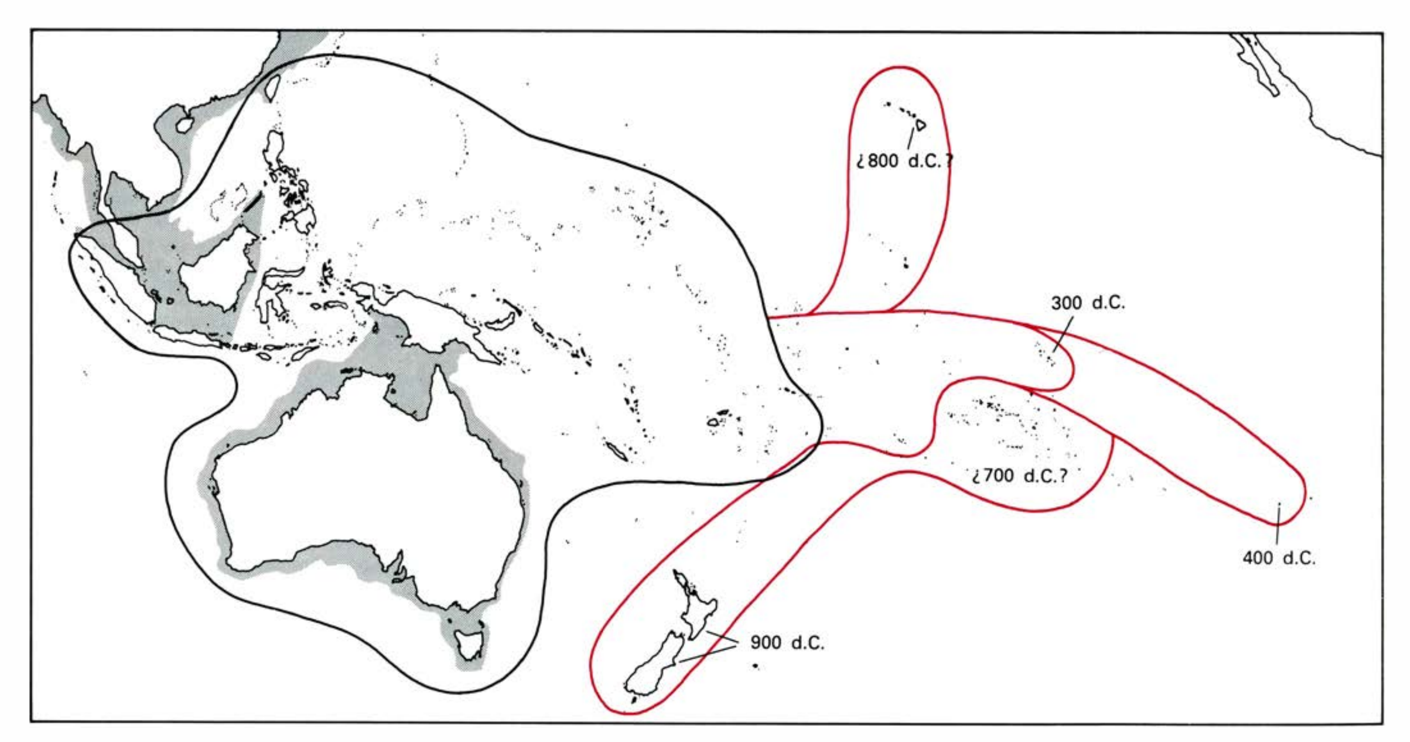
Los más antiguos austronesioparlantes hacían cerámica, construían canoas marineras provistas de arbotantes y practicaban varias artes de pesca. Sin embargo, es improbable que conociesen el empleo del metal. Por tanto, la enorme expansión geográfica de los austronesio-parlantes durante los milenios siguientes –por el oeste hasta Madagascar y por el este hasta la isla de Pascua, puntos que distan entre sí más de la mitad de la circunferencia terrestre– fue realizada por un grupo de cultura esencialmente neolítica. La práctica del cultivo del arroz no pasó al este de las islas Marianas. En un cierto momento, hace menos de 3000 años, los pueblos del sudeste asiático insular conocieron el metal y posiblemente también el ganado doméstico, pero el empleo del metal no se extendió más allá del oeste de Nueva Guinea antes de la época del primer contacto con los europeos. Por consiguiente, podemos concluir diciendo que el impulso original de una de las colonizaciones más grandiosas realizadas por el hombre brotó entre pueblos sostenidos por una economía y una tecnología neolíticas.



PRIMEROS VIAJES POR EL PACIFICO; realizados por emigrantes de habla austronésica, se iniciaron en Melanesia hace 3000 años y dieron lugar a la colonización reflejada en este mapa. Las islas occidentales de Micronesia habían sido ya alcanzadas, quizá desde las Filipinas. También Fidji y las primeras avanzadillas de la Polinesia occidental: Samoa y Tonga. Asimismo es posible que lo fuese el resto de Micronesia, aunque no hay pruebas.

Recientes excavaciones efectuadas en áreas costeras de China, al sur del Yangtze, señalan el área de la posible cuna de lo que más tarde vino a ser la expansión austronésica. Los yacimientos atribuidos a la cultura de Ch'ing-lien-kang han proporcionado pruebas del cultivo del arroz, cuchillas de hoces de piedra, huesos de ganado y de cerdo, y cerámica, tanto lisa como de barniz rojo, que data de fechas comprendidas entre 6000 y 5000 años atrás. Yacimientos parecidos a estos, algunos de ellos quizá de la misma antigüedad, se han encontrado en Formosa. Estos se atribuyen a culturas conocidas respectivamente como Ta-p'en-k'eng, Lungshanoide (del yacimiento de Lung-shan-chen en la provincia de Shandong) y Yüan-shan. La cultura de Ta-p'en-keng, la más antigua de las tres, puede equipararse verosímilmente con los más antiguos estadios reconocibles de la familia de lenguas austronésicas.

He aquí, por tanto, un punto crucial de la prehistoria del Pacífico. Poblacio-



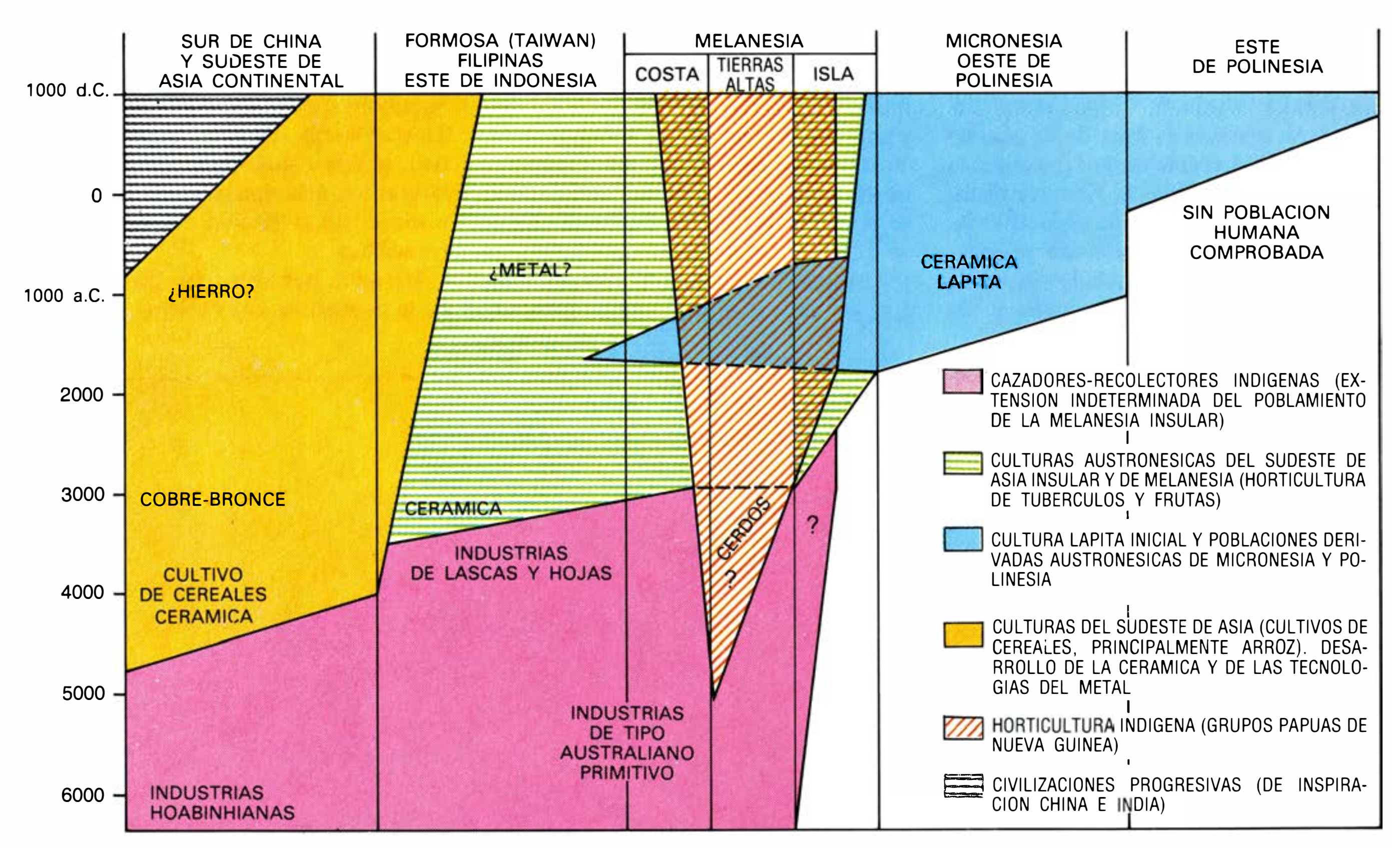
EMPUJE FINAL POLINESICO, iniciado a comienzos del primer milenio de nuestra era, que avanzó hacia el este contra vientos y corrientes dominantes, desde la zona de Tonga-Samoa, sobre una línea de 3500 kilómetros, hasta las islas Marquesas, colonizadas hacia el 300 d.C. La remota isla de Pascua pudo haber sido poblada un siglo después, y en el espacio de otros 500 años también lo fueron la Polinesia central, las islas Hawai y Nueva Zelanda.

nes identificadas como cultivadoras de cereales y austronesio-parlantes alcanzaron Formosa hace unos 6000 años. Si su método de cultivo del arroz era el de corta y quema, que necesitaba grandes extensiones, tendrían buenas razones para buscar más tierra en las islas de los archipiélagos del sur, que se hallaban al alcance de sus canoas de arbotantes, técnicamente adelantadas. La documentación arqueológica sugiere que en esta época aquellas islas meridionales estaban habitadas exclusivamente por partidas muy dispersas de cazadores-recolectores que, a la larga, fueron arrolladas por la expansión que les vino encima desde el norte.

Aunque los testimonios de que disponemos de Java y de Sumatra son pocos por el momento, en las Filipinas, en el norte de Borneo, en Celebes (Sulawesi) y hasta en Timor, por el este, los abrigos y las cuevas han proporcionado secuencias arqueológicas claras. Algunas de ellas acusan la repentina aparición de cerámica vulgar, o de barniz rojo, de hace entre 5500 y 4500 años. También aparecen azuelas, de piedra pulimentada, que son totalmente distintas de las herramientas indígenas más simples y hechas de piedra tallada, si bien esta aparición se produce en contextos arqueológicos menos seguros. En la actualidad no hay más remedio que considerar estas nuevas asociaciones de utensilios como testimonio de un significativo cambio cultural relacionado con una población neolítica en vías de expansión, exactamente igual a como lo sugiere la documentación lingüística.

Combinando la información arqueológica, lingüística y ecológica se puede completar el cuadro un poco más. En primer lugar, conforme la población se extendía en dirección sur a través de las Filipinas, Borneo y Celebes, sus componentes penetraban en una región de clima ecuatorial constantemente húmedo, donde los arroces de los cultivos primitivos no prosperaban y donde el desbrozar la tierra sin metal y sin una estación seca en que se pudiera confiar resultaba más difícil. (Los pueblos del sudeste asiático insular cultivan hoy en día arroz, pero esta práctica parece haber penetrado en muchas áreas hace sólo algunos milenios.) De aquí que las cosechas de cereales de los recién llegados perdiesen importancia y fuesen reemplazadas, como fuentes principales de alimento, por los frutales indígenas del sur (tales como el árbol del pan, la banana y el cocotero) y por la fécula de la palmera del sagú. Aunque los pueblos indígenas eran cazadores-recolectores, no horticultores, probablemente aprovechaban los mismos alimentos slvestres, junto con el taro y algunas variedades de ñame silvestre.

Los cerdos, perros y gallinas parecen haberse adaptado satisfactoriamente al ambiente meridional. Hay incluso hoy cerdos salvajes tanto en las Filipinas como en las Celebes. El ganado, si es que los colonos intentaron transportarlo, no prosperó; los yacimientos arqueológicos de las islas del sudeste de Asia no encierran huesos de ganado. Como consecuencia, cuando los colo-



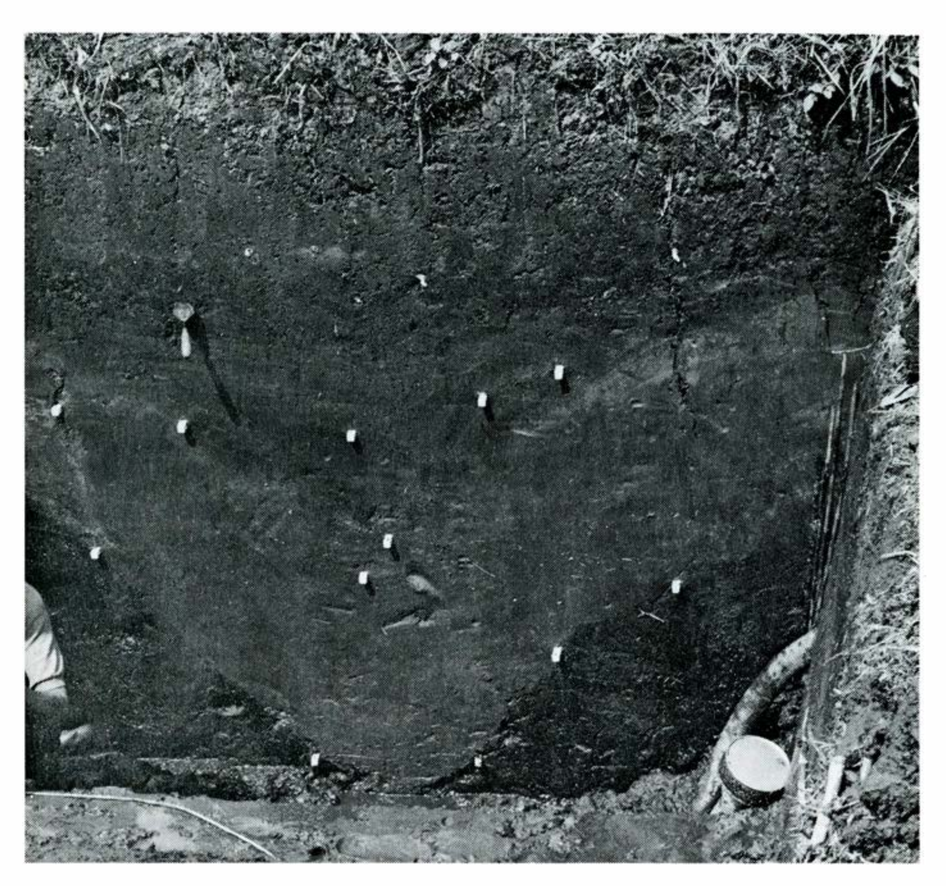
MOVIMIENTO AUSTRONESICO en el Pacífico; aparece aquí parcelado en relación con los adelantos de la cultura material en cinco regiones: sudeste asiático continental y sur de China; Formosa (Taiwan), las Filipinas e Indonesia oriental; Melanesia; Micronesia y oeste de Polinesia. Hasta hace unos 7000 años, desde el continente asiático hasta Melanesia, la mayoría de los utensilios eran de piedra tallada, más que pulimentada, y quienes los manejaban eran cazadores-recolectores. En el continente aparecieron poco después la agricultura y la cerámica; la metalurgia se empezó a conocer entre hace 5000 y 4000 años y el hierro hace cosa de 3000 años, mucho antes de que las civilizaciones india y china comenzasen a afectar a esta zona. Las artes neolíticas de la cerámica y de la horticultura aparecieron también en Formosa, las Filipinas e Indonesia oriental hace entre 6000 y 4500 años, y se difundieron por Melanesia. Aquí, y empezando por las tierras altas de Nueva Guinea, había surgido una forma de horticultura quizás incluso más antigua. Los austronesios, al enfrentarse con gentes del mismo nivel cultural, no pudieron desplazar y absorber a los melanesios, como habían hecho con los cazadores-recolectores de las Filipinas y de Indonesia oriental. En lugar de hacerlo, y empezando hace menos de 4000 años, se dispersaron por la Micronesia occidental, entonces despoblada, y desde la Melanesia insular, por la Micronesia oriental y la Polinesia occidental. La colonización está señalada por la aparición de la cerámica lapita. A comienzos de la era cristiana, cuando los colonos austronésicos habían forjado la cultura polinésica, emprendieron su mayor aventura: colonizar las Marquesas, la isla de Pascua, la Polinesia central, las islas de Hawai y Nueva Zelanda.

nos austronésicos prosiguieron en el poblamiento del Pacífico, su economía se fundaba casi por completo en tubérculos y en frutas, y no incluía ni cereales fundamentales ni animales herbívoros.

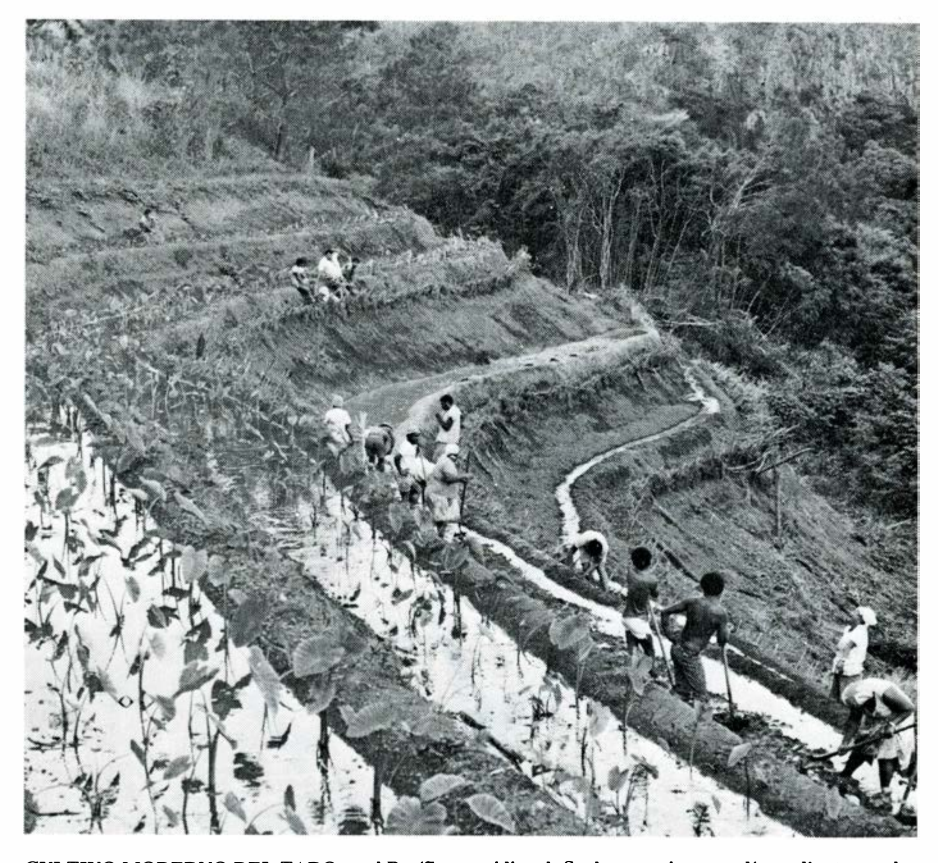
Hace cosa de 4500 años, los pueblos austronésicos llevaban expandiéndose por las islas de Indonesia oriental un milenio, aproximadamente. Esta expansión, que en último término abarcó la totalidad del sudeste asiático insular, se puede comparar con la expansión de las sociedades neolíticas por la Europa del Mesolítico. La economía de la población en vías de expansión había experimentado cambios fundamentales en lo concerniente a las plantas alimenticias, y los colonos mismos habían entablado sin duda amplios contactos con los cazadores-recolectores australoides de la región. Cabe sospechar que, como resultado de los entrecruzamientos, muchos de estos colonos austronesio-parlantes hubiesen alcanzado un estadio genéticamente intermedio entre las normas clásicas del mongoloide y del australoide. Aun cuando se admita un fluir constante de genes mongoloides desde el norte hasta el día de hoy, todavía se puede apreciar, yendo hacia el sur desde las Filipinas hasta Java o las Molucas, un gradual incremento en la herencia genética australoide. Quizá se pueda inferir también que muchos de los colonos austronesio-parlantes de la Indonesia oriental de hace unos 5000 años se parecerían mucho a los polinesios más recientes. Hay que reconocer, sin embargo, que todavía no se han descubierto los restos de esqueletos humanos que confirmen este modo de ver las cosas.

En aquel entonces –esto es, hace unos 5000 años– colonos de habla austronésica se desplazaban probablemente hacia el este, estableciendo bases en la costa norte de Nueva Guinea y en las vecinas islas del Almirantazgo, Bismarck y Salomón. La recepción que tuvieron aquí fue completamente distinta de la que habían encontrado al trasladarse al sur, lo cual nos hace volver al tema de por qué las poblaciones mongoloides tuvieron tan poco impacto genético en Melanesia.

Durante algún tiempo los investigadores se han preguntado por qué Melanesia no se convirtió sencillamente en una prolongación cultural de Indonesia. El avance de los colonos austronésicos hubiese podido verse frenado al tropezar con la malaria, especialmente si esta enfermedad parasitaria era en-



PERFIL DE UNA ZANJA DE DRENAJE, puesto de relieve por el contraste de los colores del suelo, descubierto en la excavación de un antiguo depósito pantanoso de la Kuk Tea Research Station, cerca del monte Hagen, en las tierras altas de Nueva Guinea. Algunas zanjas de drenaje de la estación, probablemente excavadas para facilitar el crecimiento de alimentos bulbosos se remontan 9000 años.



CULTIVO MODERNO DEL TARO en el Pacífico meridional. Suele recurrir a regadío mediante canales en terrazas; este sistema de canalización aprovecha la pendiente de las laderas de una colina en Nueva Caledonia. El taro, y otras plantas ricas en féculas de la familia de las aráceas, sigue siendo en la actualidad una fuente alimentaria de primer orden para muchos campesinos de las islas del Pacífico.

tonces tan devastadora en Melanesia como lo ha sido hasta fechas muy recientes. Sin embargo, una explicación más plausible es que los residentes antiguos, en particular los de Nueva Guinea, pudieran haber sido capaces de oponerse a los recién llegados. Una información decisiva para sostener esta tesis la han suministrado los trabajos arqueológicos llevados a cabo en las tierras altas, y libres de malaria, de Nueva Guinea, próximas al monte Hagen.

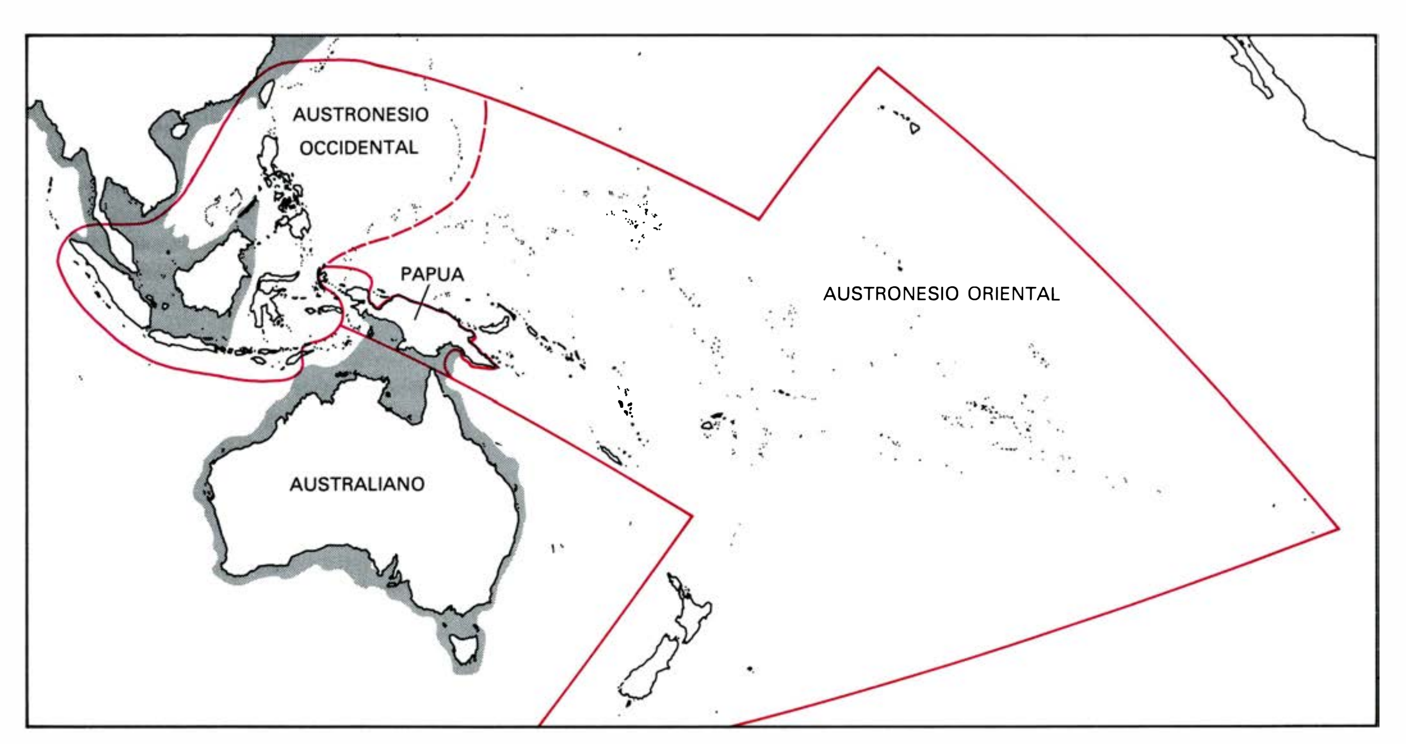
Los arqueólogos de la Universidad Nacional de Australia han descubierto que a partir de hace por lo menos 6000 años, y quizá en fecha tan temprana como hace 9000, se estaban desecando extensas zonas pantanosas de las tierras altas de Nueva Guinea por sistemas muy complejos de zanjas. Lo que éstas implican es que el drenaje fue llevado a cabo para promocionar la agricultura (quizá el cultivo del taro, aunque no se sabe que esta planta fuese nativa de Nueva Guinea). Este nuevo descubrimiento de las tierras altas plantea numerosos problemas, sometidos hoy a un intenso examen. Por el momento sólo es posible señalar que una horticultura de alguna especie era practicada en las tierras altas de Nueva Guinea antes (en lo que razonablemente cabe calcular) de que se produjesen contactos entre los melanesios y los horticultores austronesios. La realidad es que los austronesios nunca llegaron a poner el pie en las tierras altas de Nueva Guinea.

Las consecuencias de una horticultura primitiva en Melanesia son relevantes. Es posible formular la hipótesis de que los melanesios de Nueva Guinea (y probablemente los de Nueva Irlanda, Nueva Bretaña y las Salomón) se habían convertido en grandes poblaciones bastante sedentarias, y sostenidas por la agricultura, hace más de 5000 años. Si los trabajos arqueológicos futuros confirman esta hipótesis, entonces el fracaso de los austronesio-parlantes en su invasión de Melanesia puede ser atribuible a que no hayan tenido la superioridad económica y numérica que antaño habían mostrado sobre los dispersos cazadores-recolectores del sudeste de Asia insular. Habría habido un rechazo entre dos culturas neolíticas.

Los últimos 5000 años de la prehistoria provocaron en la Melanesia occidental un grado de complejidad cultura, genética y lingüística sin paralelo en el Pacífico y quizás en el mundo. Centenares de idiomas papúas y austronésicos puntuales se entrelazan llegando, por el este, incluso hasta Santa Cruz. La mayoría de ellos sólo se hablan en una zona pequeña, tal vez en un solo valle. La diversidad genética es también enorme y no se halla en relación obvia con la variedad lingüística.

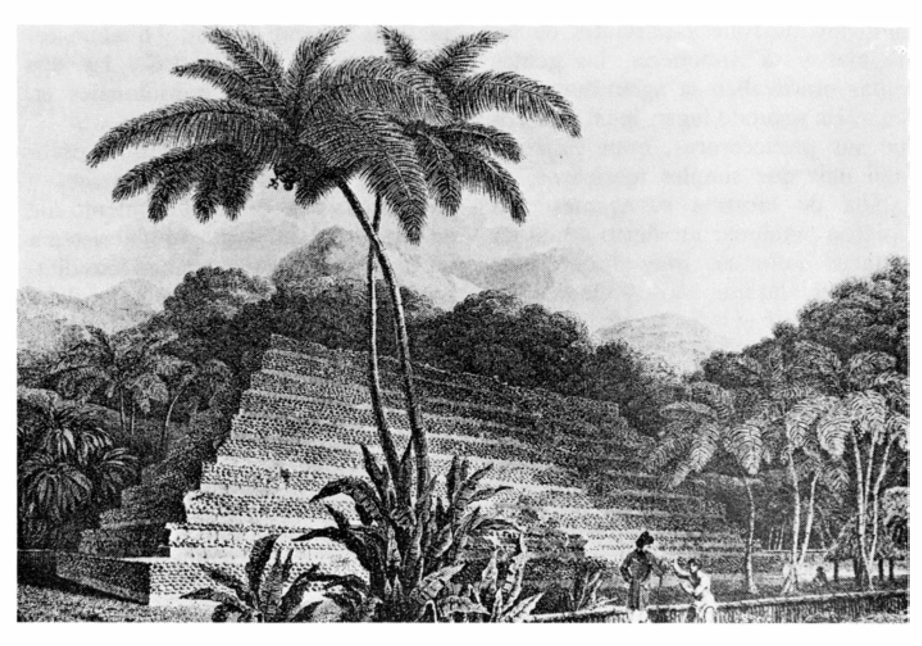
¿Por qué había de ser Melanesia tan distinta? Tal vez logremos recibir algunas respuestas reconstruyendo la prehistoria de esos últimos y cruciales 5000 años. La prueba más antigua de la presencia de colonos austronesio-parlantes en Melanesia dimana del análisis lingüístico. No hay pruebas arqueológicas coherentes de su presencia antes de la aparición, en toda la extensión de Melanesia, de la cultura de fabricantes de la cerámica llamada "lapita" (nombre derivado del yacimiento-tipo en Nueva Caledonia), entre 3500 y 3000 años atrás. Pero hacía por lo menos un milenio, según las reconstrucciones lingüísticas, que los austronesio-hablantes habían ya penetrado en las localidades costeras de Melanesia occidental, donde, durante un período subsiguiente de aislamiento de su base indonésica, desarrollaron una serie de peculiaridades lingüísticas que hoy caracterizan a los idiomas del grupo austronésico oriental. Y así, por ejemplo, los lenguajes de Micronesia oriental y de Polinesia se creen derivados de esa matriz primitiva de Melanesia occidental, y no transferidos directamente a estas islas desde Indonesia o las Filipinas.

Por lo que toca a los procesos sociales y económicos prehistóricos de Melanesia, si se nos permite adelantar una



DIVISIONES LINGUISTICAS del Pacífico y del sudeste asiático insular. Son de dos órdenes; las lenguas de la familia austronésica se encuentran desde Formosa (Taiwan), una presunta estación proto-austronésica hace unos 6000 años, extendiéndose hacia el sur a través de las islas del sudeste asiático, de la península de Malasia y de Micronesia occidental. Estas lenguas forman la mitad occidental de la familia austronésica. En el resto de Micronesia, a través de Polinesia y en partes de Melanesia, se localizan las lenguas de la mitad oriental de la familia austronésica. La segunda familia de lenguas es la papúa, un grupo sumamente diversificado, que se habla principalmente en Nueva Guinea, si bien tiene ramificaciones en las islas Molucas y en la Melanesia adyacente, donde se mezclan los idiomas austronésicos y papúas. Las lenguas aborígenes australianas no parecen tener relación con el papúa.

apreciación inicial, tanto los registros de la arqueología como los de la etnografía reciente facilitan una cierta orientación. El presupuesto básico es que las sociedades prehistóricas de Melanesia no eran más complejas, particularmente en lo referente a integración política, de lo que son hoy en día. Contado que ese fuera el caso, entonces yo sugeriría que la población inicial cazadora-recolectora de Nueva Guinea estaba organizada en forma de bandas bastante móviles, compuesta cada una por unas cuantas familias, por lo menos durante los primeros 20.000 años de su residencia. Hasta un pasado aún reciente, tales sistemas sociales eran característicos de los pueblos aborígenes de Australia y de las Filipinas.



PEDESTAL DE UN TEMPLO POLINESIO, construido en 1767. El naturalista Joseph Banks, durante la visita que el capitán Cook efectuó a Tahití dos años después, tuvo oportunidad de contemplarlo. Banks lo describió como "un conjunto magnífico" y declaró que "su tamaño y hechura casi exceden lo verosímil". Cuando se hizo este esbozo, en 1799, el pedestal tenía diez niveles; hoy sólo queda una parte de la base.

La siguiente fase prehistórica habría sido la iniciación de la horticultura en Nueva Guinea y quizás en las islas adyacentes. Junto con la agricultura se habría producido el asentamiento en aldeas más o menos permanentes, en la vecindad de las zonas cultivadas. Al quedar limitada la movilidad, el cuadro etnográfico de Melanesia, en el que los grupos étnicos ocupan zonas pequeñas y tienden a casarse dentro de ellas, se vio perfilado.

El mando dentro de estos grupos étnicos rara vez era hereditario. Normalmente lo adquirían, de adultos, ciertos individuos, llamados grandes hombres, capaces de aventajar a sus compañeros de tribu en riqueza y en prestigio. Hasta un pasado reciente eran frecuentes las hostilidades abiertas entre grupos limitados por la geografía. Si éste ha sido el cuadro social de Melanesia durante 5000 años, no es difícil de comprender cómo surgió la diversidad genética, lingüística y social. En tiempos recientes, los contactos pacíficos entre los grupos dependían de alianzas cambiantes, fundadas en ocasionales banquetes ceremoniales y en actividades comerciales a menudo de gran amplitud. En zonas de elevada densidad de población, las redes comerciales se convertían a menudo en sistemas de gran complejidad ritual. En la época de su primer contacto con los europeos, los melanesios eran los hombres de negocios y los traficantes del Pacífico.

En este sentido, diferían completamente de los polinesios y de muchos de los micronesios, que formaban grupos étnicos mucho más expandidos geográficamente, cuyas sociedades se caracterizaban por sistemas de mando hereditario, y para quienes el comercio ejercido por individuos estaba subordinado por lo general a normas de tributo comunal o de redistribución que estaban en manos de los jefes.

Así era, con mucha probabilidad, el cuadro social y étnico dominante en Melanesia a la llegada de los primeros colonos austronésicos. Los recién llegados fueron incapaces de imponer su propio orden en Melanesia; sus poblados se limitaron a incrementar la diversidad de la región. Hace aproximadamente 4000 años, otras culturas del tipo de la indígena melanesia fueron trasplantadas a puntos tan lejanos como Nueva Caledonia y las Nuevas Hébridas. Incluso cabe en lo posible que estas dos últimas zonas hubiesen sido pobladas por melanesios mucho antes de que apareciesen los primeros austronesio-parlantes, aunque no tengamos pruebas arqueológicas claras de ello. Entre tanto, en otro lugar del Pacífico occidental, el oeste de Micronesia pudo haber sido poblado por austronesio-parlantes llegados directamente de las Filipinas. Los amplios archipiélagos de la Micronesia oriental, de Fidji y de toda Polinesia aún esperaban, sin embargo, a sus primeros pobladores humanos.

La prehistoria de Oceanía alcanza ahora su fase más notable y más expansiva. Hace unos 3500 años, en el oeste de Melanesia se habían establecido representantes de la cultura lapita, según parece, en las cercanías del archipiélago de Bismarck, donde se ha encontrado su característica cerámica estampada e incisa. Esta población pudo haber penetrado en la zona no mucho antes, procedente quizá de Indonesia oriental o de las Filipinas. Hasta ahora no hay pruebas arqueológicas del punto de origen preciso de la cultura lapita, e incluso pudiera ocurrir que los caracteres que distinguen a la cerámica lapita se hubiesen formado, de hecho, dentro de Melanesia.

Cualquiera que sea su origen, la nueva población no entabló un intenso contacto genético o cultural con los melanesios vecinos. En vez de eso, como acredita la presencia de cerámica lapita de los yacimientos costeros y de las islas próximas, los lapitas durante los 500 años inmediatos colonizaron Tonga y Samoa, a unos 5000 kilómetros de distancia, en el Pacífico central. Los polinesios habían llegado al fin a Polinesia.

Del mismo modo, quizá, los micronesios orientales arribaron a su zona, aunque la ausencia de verdadera cerámica lapita en aquellos atolones, carentes de arcilla, hace difícil de leer esa parte del relato. Sin embargo, donde los hechos arqueológicos se hallan ausentes, las pruebas lingüísticas resultan sugestivas. Los idiomas de Fidji, del conjunto de Polinesia y de los archipiélagos de Micronesia oriental –las islas Carolinas, las Marshall y las Gilbert (ahora Kiribati, miembro independiente de la "Commonwealth" británica)– tienen todos ellos un origen común inmediato en la familia de lenguas austronésicas. Por ello no parece haber duda de que los colonizadores de Micronesia oriental fueron también portadores de la cultura lapita.

¿Cuáles eran, aparte de la cerámica característica, los elementos principales de esta cultura? En primer lugar,

como los austronesio-parlantes de las Filipinas y de Indonesia, las gentes lapitas practicaban la agricultura y la pesca. En segundo lugar, igual también que sus predecesores, eran viajeros. Eran más que simples marineros; se trataba de diestros navegantes que supieron mantener un cierto grado de contacto entre sus muy diseminadas estaciones durante varios cientos de años. En este punto los registros arqueológicos ofrecen pruebas de sus precoces hazañas marineras dentro de Melanesia. La obsidiana de los volcanes de Nueva Bretaña ha sido exhumada en yacimientos lapitas de Melanesia a distancias de hasta 2600 kilómetros. Y, en último término, las gentes lapitas fueron colonizadores, altamente cualificados, de islas vírgenes.

Tras su fase inicial de expansión triunfante, la cultura lapita se vio sujeta a cambios inexorables. Desaparece de los registros arqueológicos de Melanesia hace unos 2500 años, en la segunda mitad del primer milenio a.C. En Tonga y en Samoa, sus primeras avanzadillas polinésicas, la cultura lapita tuvo una larga duración. Allí, durante todo el primer milenio a.C., los nuevos colonos desarrollaron muchos de los caracteres que habrían de extenderse hasta los más remotos rincones de Polinesia durante los siguientes 1000 años. Sin embargo, también aquí se hizo sentir el cambio. Por ejemplo, estos polinesios occidentales perdieron la facultad de fabricar cerámica, posiblemente como consecuencia del reducido contacto con las sociedades lapitas de Melanesia ya en retroceso. En relación con esto, las gentes de Fidji mantuvieron el contacto con el oeste, por la cual nos ha llegado un registro arqueológico más complejo de su desarrollo cultural. Hoy en día los pobladores de Fidji se encuentran entre los melanesios del oeste y los polinesios del este como un pueblo intermedio.

A comienzos del primer milenio d.C. los polinesios occidentales, cuyas colonias tenían entonces más de 1000 años de antigüedad, estaban dispuestos para emprender sus más memorables viajes. Canoas dobles y grandes, capaces de transportar las plantas alimenticias y los animales necesarios para la colonización, zarparon contra los vientos y las corrientes dominantes para poblar las islas Marquesas hacia el 300 d.C. y la isla de Pascua, uno de los lugares más aislados de la superficie terrestre, quizás un siglo después. Medio milenio más tarde, los polinesios occidentales también habían colonizado las islas de Polinesia central, la cadena septentrional de la distante Hawai, y finalmente, tal vez hacia el 900 d.C., las dos grandes avanzadillas meridionales en Nueva Zelanda.

Un elemento que fue sin duda esencial para el éxito de estos largos y pavorosos viajes de descubrimiento fue un enérgico caudillaje. Aquí el sistema social polinésico de autoridad hereditaria y refrendada por la religión debe haber sido una gran ventaja. En tiempos del capitán Cook, este aspecto de la organización social polinésica había desembocado en las despóticas y poderosas jefaturas de Tonga, islas de Hawai e islas de la Sociedad, por citar sólo las zonas más desarrolladas y populosas de Polinesia.

Los maoríes, los polinesios que terminaron en la templada y (a escala insular) vasta Nueva Zelanda, se vieron obligados a efectuar algunas radicales adaptaciones económicas. Reemplazaron sus alimentos tropicales inadaptables por la patata dulce (importada antes del 1000 d.C. de Ecuador o de Perú por medios ignorados) y por los rizomas, parecidos a raíces, de los helechos nativos. No se importaron cerdos en Nueva Zelanda, aunque sí perros; y otra de las principales fuentes de carne fueron los mamíferos marinos y los dinornis, una especie de aves no voladoras, algunas de gran tamaño, que se extinguieron pronto.

A comienzos del primer milenio d.C., en una época en que el comercio oceánico entre China y la India había comenzado ya, los parientes austronésicos de los polinesios de las Indias orientales emprendieron por su cuenta un viaje épico y se establecieron en Madagascar, frente a la costa de Africa. Sin embargo, hasta el segundo milenio de nuestra era, algo después del año 1100 d.C., los habitantes de la isla de Pascua, situados a unos 21.000 kilómetros de distancia al otro lado del mundo, no comenzaron a labrar y erigir, en las terrazas de los templos, sus estatuas de piedra ordenadas en filas. Aunque estas estatuas han alcanzado más fama que cualquier otra realización de la arquitectura polinesia, las terrazas de los templos, las estatuas y los monumentos funerarios de otras partes de Polinesia son igualmente impresionantes.

Así acaba esta reconstrucción. Algunos de mis colegas discreparán de mí al atribuir a los polinesios una procedencia de Indonesia o de las Filipinas. Hay incluso una tesis publicada sosteniendo que los polinesios pueden haber surgido directamente de una matriz genética y lingüística melanesia. En este terreno hay margen para un complejo desacuerdo, pero yo no veo pruebas que apoyen esa hipótesis, particularmente desde un punto de vista genético. Por lo menos hay una cosa completamente segura: los polinesios no son de ascendencia india americana, pese a algunas pruebas de contactos de escasa importancia con la costa sudamericana del Pacífico.

Tal vez podría yo terminar con una observación que acaso tenga una significación antropológica general. Los polinesios, cuyas proezas en la colonización fueron sin duda las más esforzadas de toda Oceanía, desarrollaron también las formas más amplias y más centralizadas del gobierno de jefes hereditarios del Pacífico. Los polinesios ancestrales del período de la expansión lapita habían realizado, con absoluta claridad, una serie de adaptaciones culturales –sociales, económicas y relacionadas con la navegación– sin las cuales hubiera sido inconcebible la colonización de Polinesia. Los sistemas de caudillaje, las plantas alimenticias domesticadas y las grandes canoas no nacieron plenamente formadas y por pura casualidad. Evolucionaron, en parte, en los primeros milenios de la expansión austronésica, y se perfeccionaron aún más cuando los polinesios se lanzaron a emprender viajes de colonización más largos que los anteriores.

Para mí, la prehistoria del Pacífico en su conjunto ofrece el testimonio de un equilibrio cultural en largos períodos, acompañado de un progreso hacia una mayor complejidad cultural. No veo síntomas de simplificación o degradación cultural a largo plazo, si bien es verdad que algunas islas, en particular atolones, son tan deficientes en recursos naturales que el desarrollo cultural de sus pobladores se vio necesariamente limitado. También es cierto que algunas islas, de manera particular la de Pascua, tuvieron períodos de decadencia cultural y demográfica, sea como consecuencia de la guerra o de disminución de los recursos disponibles, o de ambas cosas. También se pueden descubrir a través del Pacífico numerosos ejemplos de daños ambientales, incluidas la degradación de la vegetación y la extinción de animales en tiempos prehistóricos. Sin embargo, ninguna de estas excepciones implica una disminución irreversible de la complejidad cultural humana. Dadas las muchas barreras que los emigrantes de Oceanía hubieron de cruzar en su largo período de colonización, es probable que cualquier grupo que se deslizase hacia atrás dejase pocos descendientes para referir lo sucedido.

Reacciones químicas sin solvatación

Existen nuevas técnicas que nos permiten examinar, en ausencia de disolvente, el comportamiento de sustancias químicas reaccionantes en un estado de "desnudez"

Robert T. McIver, Jr.

La química es la ciencia de las moléculas. Trata del cómo y del por qué los átomos se unen para formar moléculas y de cuán rápidamente éstas dan lugar a nuevas configuraciones. La mayoría de las reacciones químicas ocurren en un disolvente como el agua, sea en un tubo de ensayo o bien en una célula viviente. Desde antiguo ha despertado la curiosidad de los químicos el averiguar qué sucede cuando se cambia el disolvente o, incluso, cuando éste se elimina. ¿Sigue teniendo lugar la reacción en ausencia de disolvente? ¿Resultan los mismos productos de ella?

Pocos libros de texto abordan esas cuestiones y ello es debido a que no se ha desarrollado aún una teoría completa acerca del papel de los disolventes. Sin embargo, se trata de cuestiones importantes por varias razones. En primer lugar, los factores fundamentales que influyen en las velocidades de reacción no se pueden estudiar en solución a causa de que las moléculas del propio disolvente interaccionan fuertemente con las especies químicas reaccionantes. Si se pudiera eliminar completamente el disolvente, se lograría medir la reactividad intrínseca de los componentes de reacción "desnudos", soslayando así los efectos de la solvatación. Una segunda razón para interesarse por el papel de la solvatación es la evidencia de que, en los organismos vivientes, las zonas activas de las moléculas enzimáticas excluyen el agua, de manera que pueden llevar a cabo reacciones que no procederían en solución acuosa o bien sólo muy lentamente.

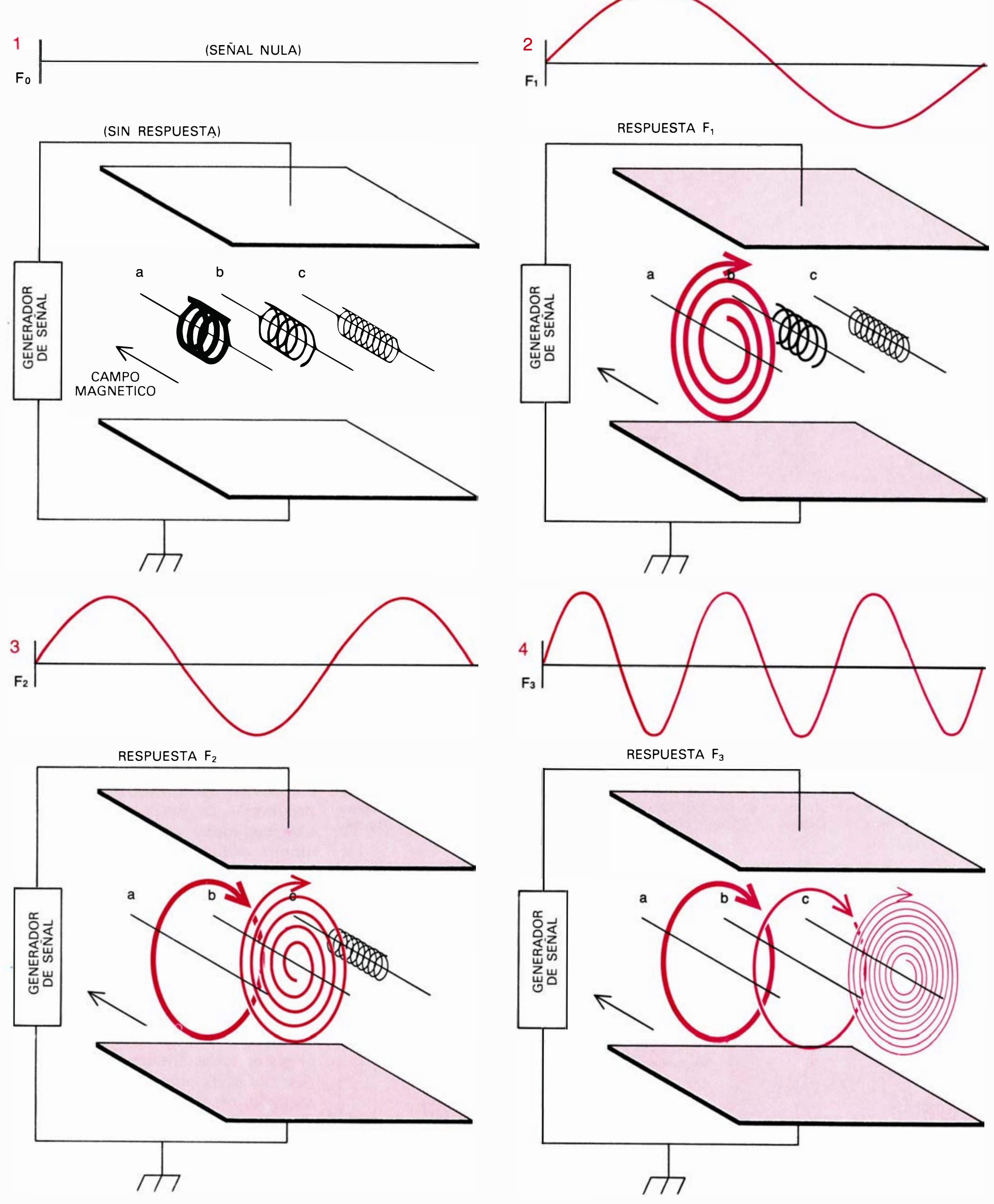
En el presente artículo describiré algunos experimentos en los cuales iones –fragmentos de moléculas provistos de carga eléctrica– sufren reacciones químicas sin la menor interferencia de disolvente. Tales experimentos se realizan capturando iones recientemente producidos en un campo magnético y luego identificando los productos de reacción mediante un tipo de espectrometría de masas que determina el comportamiento de las partículas capturadas en un campo eléctrico alterno. El aparato que permite realizar estos experimentos se denomina espectrómetro de masas por resonancia ciclotrónica pulsátil de ion. Si bien es cierto que desde hace tiempo se ha venido suponiendo que los disolventes disminuyen las velocidades de reacción, el grado de retardación ha sido difícil de medir. En un caso típico, nuestros experimentos muestran que las especies iónicas en fase gaseosa reaccionan unos tres mil millones (3×10^9) de veces más rápidamente que cuando se encuentran disueltas en acetona y unos mil billones (10^{15}) de veces más que en agua.

Otros experimentos muestran el efecto de la solvatación en la acidez y la basicidad de los iones. Hemos logrado medir por primera vez, con gran precisión, la cantidad de energía liberada cuando un ácido (un dador de protones; es decir, iones de hidrógeno) reacciona con una base (un aceptor de protones) en fase gaseosa. Estas investigaciones han permitido construir una tabla de afinidades protónicas que muestra la basicidad relativa de unos 300 compuestos. Por ejemplo, una de las bases más fuertes, el ion negativo de hidrógeno (H^-), libera unas 10 veces más energía cuando se combina con un protón, dando la molécula de hidrógeno (H_2), que una de las bases más débiles, el helio (He), cuando éste se combina con un protón formando el ion hidruro de helio (HeH^-).

El estudio de las reacciones de los iones y de las moléculas aisladas es una cuestión experimental difícil. Deben crearse las especies reaccionantes en el seno de un gas a baja presión, de manera que el movimiento de aquéllas proceda evitando colisionar con superficies sólidas. Asimismo, debe idearse un método para detectar los productos de reacción. Veamos cómo se puede superar cada uno de esos problemas.

Los iones son átomos o moléculas con un exceso o defecto de electrones. Por ejemplo, un átomo de hidrógeno posee un electrón. La extracción de este electrón lo convierte en un protón desnudo (H^+); la adición de un electrón a un átomo de hidrógeno lo convierte en cambio en una especie negativa formada por un protón y dos electrones (H^-). Un átomo de fluor (F) posee nueve protones y nueve electrones, y un ion fluoruro (F^-), nueve protones y 10 electrones. Muchos importantes tipos de reacciones en solución implican iones como especies intermedias, sea directa o bien indirectamente. Generalmente, tales reacciones son sensibles a la naturaleza del medio solvente, puesto que la carga eléctrica del ion hace que éste interaccione intensamente con las moléculas del disolvente.

Los iones reaccionantes pueden originarse en solución simplemente adicionando ciertas sustancias al disolvente. Por ejemplo, cuando se añade al agua cloruro sódico (NaCl; sal de cocina) éste se disuelve formando iones sodio (Na^+) e iones cloruro (Cl^-). Y cuando se burbujea a través de agua el cloruro de hidrógeno gaseoso (HCl), éste se absorbe formando una solución de ácido clorhídrico. En agua, la mayoría de las moléculas de cloruro de hidrógeno se hallan escindidas (disociadas) formando iones: $HCl + H_2O \rightarrow$ $\rightarrow H_3O^+ + Cl^-$. La fórmula H_3O^+ para los iones cargados positivamente presentes en la solución representa, sin embargo, una estructura simplificada



EL ESPECTROMETRO de resonancia cliclotrónica de iones permite identificar los productos de las reacciones entre iones reunidos en fase gaseosa, en ausencia de disolventes. Tales reacciones dan lugar a nuevos iones cuya razón masa/carga se puede establecer como sigue: Una partícula cargada de un campo magnético describe una órbita con una frecuencia de revolución determinada por la intensidad del campo y su masa y carga. Si se aplica a la partícula un campo eléctrico oscilatorio, cuya frecuencia sea igual a su frecuencia de revolución, entonces absorberá energía a través de un proceso denominado resonancia ciclotrónica, pasando a una órbita mayor pero conservando la frecuencia de revolución. Este diagrama, consistente en cuatro partes, muestra cómo las órbitas de tres partículas con razones masa/carga diferentes pueden ser ensanchadas selectivamente mediante la resonancia ciclotrónica. Se supone que las tres partículas *a, b* y *c* poseen razones masa/carga en la relación 3:2:1. Por consiguiente, la frecuencia ciclotrónica de *a* es una tercera parte de la de *b*, y la de *b*, una mitad de la *c* (*1*) [*arriba, a la izquierda*]. Si se aplica una señal sinusoidal de frecuencia igual a la frecuencia ciclotrónica de la partícula *a*, la órbita de ésta se ensanchará gradualmente, mientras que las de *b* y *c* permanecerán esencialmente inalteradas (*2*) [*arriba, a la derecha*]. Si la frencuencia de la señal se eleva hasta igualar la frecuencia ciclotrónica de la partícula *b*, la órbita de ésta se ensanchará, sin afectar la de *a* o *c* (*3*) (*abajo*). Finalmente, puede ensancharse la órbita de *c* seleccionando una señal de frecuencia todavía mayor (*4*).

para los mismos. En realidad, el protón se halla muy solvatado, o unido a un apiñamiento de moléculas de agua, por una red de enlaces de hidrógeno en los cuales los átomos de éste constituyen puentes con los átomos de oxígeno.

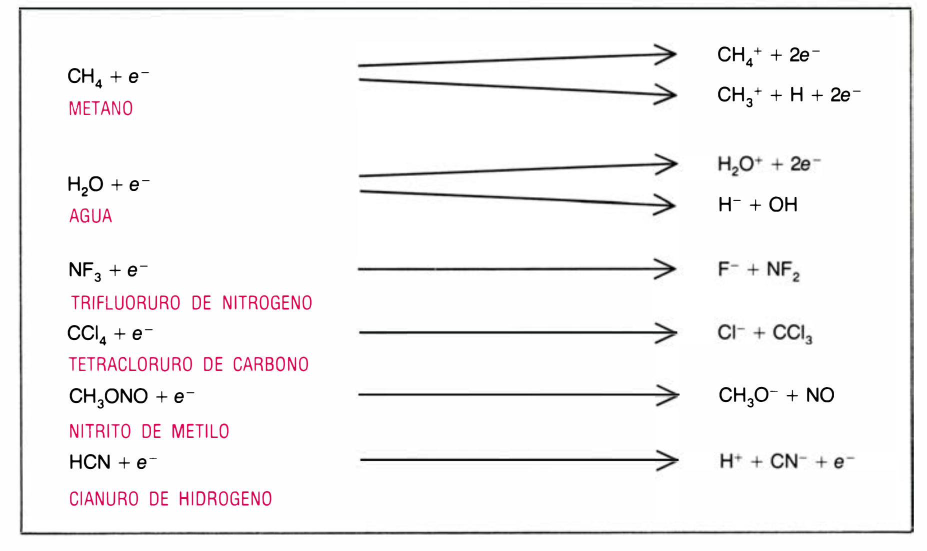
En ausencia de solvatación, creadora de iones, es preciso recurrir a procedimientos extraordinarios. Se generan iones en gases a elevadas temperaturas, como en las llamas; sin embargo, no existe prácticamente una ionización a la temperatura ambiente. Para la disociación de las moléculas del cloruro de hidrógeno gaseoso en sus iones H^+ y Cl^- debe aportarse una energía de unas 333 kilocalorías por mol de ellas. (Un mol de un compuesto químico es la cantidad del mismo, en gramos, igual a la cifra que expresa su masa molecular; por ejemplo, un mol de cloruro de hidrógeno, cuya masa molecular es de 36,5, es 36,5 gramos.) La energía de ionización supera pues ampliamente las 103 kilocalorías por mol necesarias para romper el cloruro de hidrógeno en sus dos átomos constituyentes (H y Cl). Este hecho muestra que la atracción eléctrica entre la carga positiva y la negativa de los iones H^+ y Cl^- en fase gaseosa es realmente fuerte. Sin embargo, en solución tal atracción resulta muy atenuada debido a que las moléculas del disolvente se interponen entre los iones, protegiendo los unos de los otros, y facilitando así su formación.

HCl → H^+ + Cl^-
CLORURO DE HIDROGENO, PROTON, ION CLORURO

H^+ + H_2O → H_3O^+
PROTON, AGUA, ION HIDRONIO

ION HIDRONIO

SE FORMAN IONES HIDRONIO cuando ácidos, como el cloruro de hidrógeno, se disuelven e ionizan en agua. La ionización del cloruro de hidrógeno rinde un protón, o ion hidrógeno (H^+), y un ion cloruro (Cl^-). Los protones cedidos se unen fuertemente a las moléculas de agua dando iones hidronio, cuya fórmula es H_3O^+. En realidad, el ion hidronio posee una estructura compleja consistente en muchas moléculas de agua alrededor de un protón. Esta estructura se mantiene merced a enlaces de hidrógeno (*puntos coloreados*) en los cuales un átomo de hidrógeno actúa de puente entre dos átomos de oxígeno.



LA IONIZACION POR IMPACTO DE ELECTRONES es una manera eficaz para crear iones en fase gaseosa. Se pueden obtener iones con carga eléctrica positiva o negativa ajustando la energía de los electrones que entran en colisión. Veamos el segundo ejemplo: si una molécula de agua resulta golpeada por un electrón con una energía de 6,5 volt, éste aun permanece unido al átomo de hidrógeno cuando la molécula se disocia dando H^- y HO. Cuando la energía es superior a 1,3 volt, la molécula de agua pierde un electrón, formando el ion H_2O^+. Los iones así formados son partículas libres en fase gaseosa.

Para lograr la formación de iones aislados en fase gaseosa se debe suministrar de otra forma la energía requerida. El método empleado, que resulta más conveniente, es el de la ionización por impacto de electrones. Los electrones emitidos por un filamento caliente se aceleran mediante un campo eléctrico y se proyectan contra las moléculas del gas. Si la energía de colisión de éstas con los electrones es mayor que el valor del umbral energético, llamado potencial de ionización, entonces se produce la ionización. A medida que se aumenta la energía de colisión por encima de dicho umbral, la producción de iones suele aumentar. Con este método se logra obtener una amplia variedad de iones positivos y negativos.

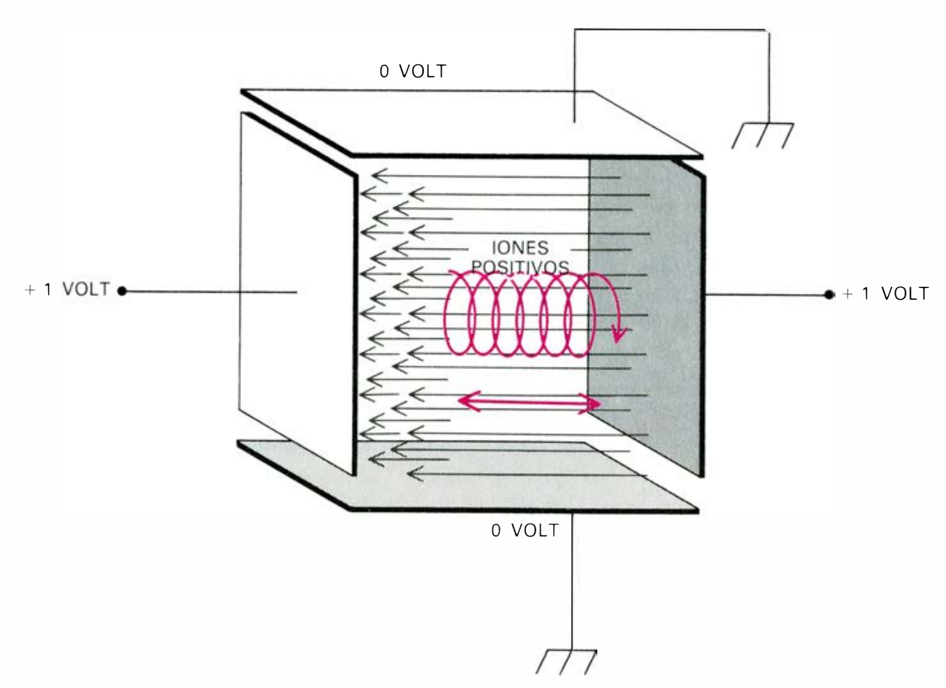
Si bien los iones en solución se encuentran estabilizados merced a las moléculas de disolvente en su entorno, y por ello se evita su desaparición, en fase gaseosa la situación es en cambio radicalmente diferente. Puesto que resultan del impacto con los electrones, los iones se desplazan rápidamente por el gas en todas direcciones a velocidades de hasta unos 500 metros por segundo, resultando destruidos cuando chocan con una superficie sólida, a la cual ceden su carga eléctrica, soliendo reaccionar con las moléculas adsorbidas en ella. Por consiguiente, es evidente que deben emplearse recipientes especiales a fin de restringir el movimiento de los iones y así mantenerlos en fase gaseosa el tiempo suficiente para poder observar su comportamiento químico.

Se han ideado varios métodos para almacenar iones gaseosos. El que mis

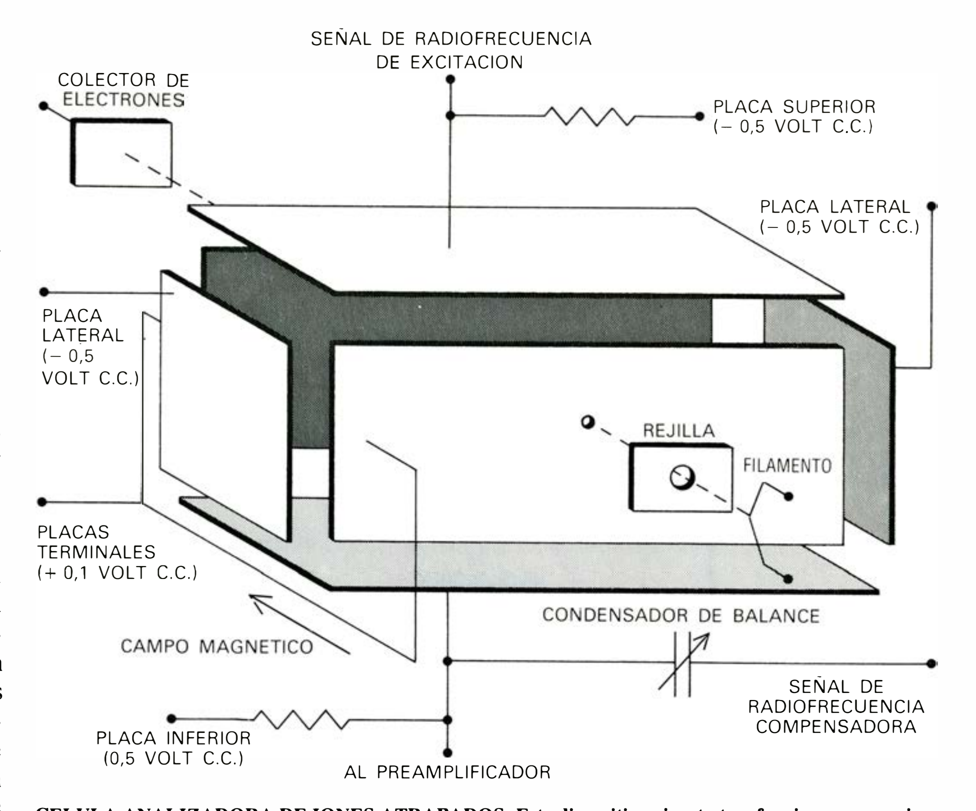
colegas y yo hemos encontrado de mayor utilidad es la llamada trampa magnetostática de iones. El correspondiente dispositivo combina un campo magnético intenso y uniforme con un campo eléctrico débil, a fin de restringir el movimento de los iones en tres direcciones. El campo magnético obliga a los iones a moverse en pequeñas órbitas circulares y, por ello, impide que se desplacen perpendicularmente al mismo. Se impide el movimiento paralelo al campo magnético mediante un campo eléctrico débil generado por voltajes aplicados a placas dispuestas en extremos opuestos de la trampa. Un voltaje positivo en las placas opuestas repele a los iones negativos y, en consecuencia, los atrapa. Un voltaje negativo apresa a los iones negativos. La eficacia de la trampa es tal que permite almacenar los iones durante varios minutos. Se mantiene la presión dentro de la trampa por debajo de la milmillonésima de atmósfera (10^{-9}) a fin de eliminar los contaminantes que pudieran interaccionar con los iones. Cuando se generan éstos por impacto electrónico adquieren, al principio, un exceso de energía de vibración y de traslación, pero, a las pocas décimas de segundo, se "enfrían" hasta alcanzar la temperatura del ambiente a través de múltiples colisiones con las pocas moléculas de gas restantes no ionizadas. No obstante, incluso a la temperatura del ambiente, los iones y las moléculas se mueven a velocidades próximas a la del sonido; es decir, unos 320 metros por segundo.

Puesto que nuestro objetivo era el estudio de las reacciones químicas de iones en ausencia de disolventes, fue necesario idear métodos para identificar tanto las especies reaccionantes como los productos formados a partir de ellas. Era preciso que el método fuera extremadamente sensible, puesto que se manejaba solamente cosa de un millón de iones reaccionantes en cada experimento. Un instrumento útil para detectar iones en tan pequeñas cantidades es el espectrómetro de masas. En este aparato se proyectan los iones dentro de un campo magnético, describiendo en el seno del mismo arcos de radios diferentes, según la relación entre su masa y su carga. Se enfocan los rayos iónicos resultantes sobre un detector, según sus diferentes razones masa/carga, ajustando la intensidad del campo magnético y así logrando "pesarlos" selectivamente.

En nuestro laboratorio de la Universidad de California en Irvine hemos adoptado una variante de la espectro-



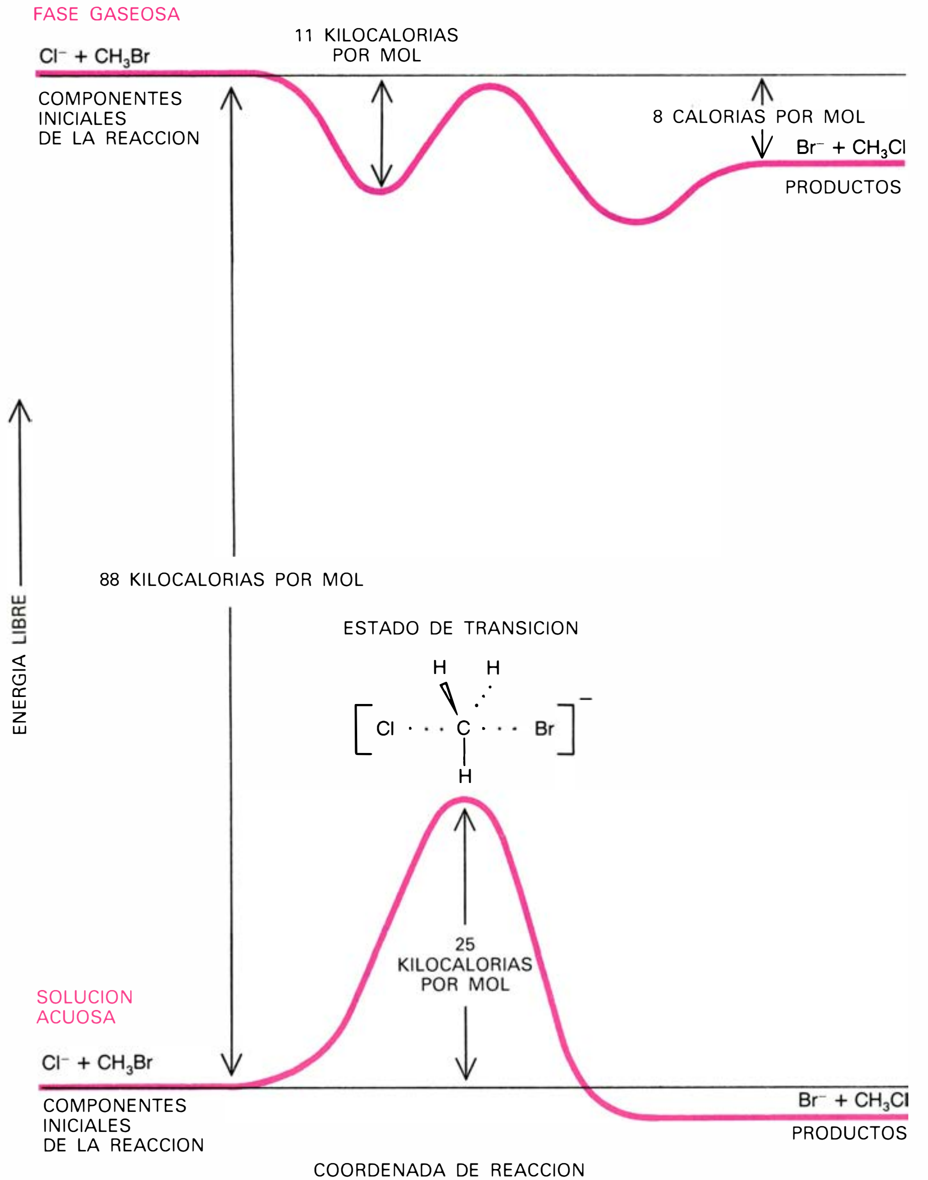
CONFINAMIENTO DE IONES EN FASE GASEOSA; se puede llevar a cabo el confinamiento mediante una trampa magnetostática de iones que permite guardarlos durante unos minutos. Un campo intenso y uniforme de fuerzas magnéticas obliga a los iones a describir pequeñas órbitas circulares o helicoidales, con lo que se restringe la movilidad en dirección perpendicular al campo magnético. Se limita su movimiento paralelo al campo magnético mediante un débil campo eléctrico generado por voltajes aplicados a las placas terminales de la trampa. Se elige el signo del voltaje de manera que sea el mismo que el de la carga de los iones que se pretende confinar. De esta forma, las repulsiones eléctricas obligan a los iones a oscilar de un lado a otro sin alcanzar dichas placas terminales. La presión en el interior de la trampa magnética de iones se mantiene por debajo de una milmillonésima de atmósfera.



CELULA ANALIZADORA DE IONES ATRAPADOS. Este dispositivo ejecuta tres funciones necesarias para la medición de la reactividad de los iones desnudos en fase gaseosa. Se produce el suministro inicial de los iones gaseosos bombardeando los átomos o las moléculas de elección con electrones emitidos por un filamento calentado. Al poco tiempo, los iones producidos son capturados por la combinación de campos magnético y eléctrico (la trampa magnética de iones). Después de dejar progresar la reacción durante un breve período predeterminado (generalmente menos de un segundo) se acelera selectivamente los iones atrapados por resonancia ciclotrónica mediante una señal de radiofrecuencia oscilatoria. Al principio, una señal de radiofrecuencia compensatoria equilibra la señal de radiofrecuencia aplicada a la placa superior, causando así un cero en la entrada del preamplificador. Cuando la energía es absorbida por los iones sujetos a resonancia ciclotrónica a una cierta frecuencia, el movimiento coherente de los iones desequilibra la señal que entra en el preamplificador. La idea de la resonancia ciclotrónica data de 1930.

metría de masas en la cual se ensancha selectivamente, mediante un campo eléctrico de radiofrecuencia, los radios orbitales de los iones atrapados en el campo magnético. Este método se denomina resonancia ciclotrónica de iones (ICR). Se trata de una contribución relativamente reciente a las técnicas instrumentales empleadas por los químicos pero, como sucede en la mayoría de técnicas nuevas, la idea básica de ella había sido elaborada ya hace muchos años. El concepto de la resonancia ciclotrónica fue empleada por Ernest O. Lawrence en los primeros años treinta en la construcción de sus primeros mecanismos para la aceleración de protones y otras partículas. Lawrence se dio cuenta de que las ecuaciones del movimiento para una partícula cargada en un campo eléctrico uniforme predicen que su período de revolución es constante. Observó, por añadidura, que las partículas pueden ser aceleradas hasta velocidades que se aproximan a la de la luz cuando se las somete a un campo eléctrico que oscila en resonancia con su período orbital.

La espectrometría de masas ICR pone deliberadamente más énfasis en la selectividad que en la aceleración de las partículas. Al principio, mediante un campo magnético uniforme, de intensidad adecuada, se mantienen los iones de diferentes masas y cargas en órbitas circulares. La frecuencia orbital de cada especie es el producto de la carga eléctrica del ion por la intensidad del campo magnético, dividido por la masa del ion. Por ejemplo, a la intensidad de campo magnético de un tesla (10^4 gauss) –alcanzable fácilmente con un electroimán de laboratorio– un ion cuya razón masa/carga es de 10 realiza 1.530.000 revoluciones por segundo. En cambio, un ion de razón masa/carga de 100 realiza 10 veces menos revoluciones por segundo; es decir, 153.000.



EL DIAGRAMA DE ENERGIA POTENCIAL muestra cómo la energía de una reacción química cambia al pasar de las especies reaccionantes a sus productos. Las dos curvas se refieren a la reacción de sustitución en la cual un ion cloruro (Cl^-) desplaza a un ion de bromuro (Br^-) en el bromuro de metilo. La curva superior indica el cambio de la energía potencial cuando la reacción ocurre en fase gaseosa, en ausencia de disolvente. La curva inferior describe la misma reacción en solución acuosa. Cuando la reacción se transfiere de la fase gaseosa a solución acuosa, la energía potencial de las especies reaccionantes disminuye marcadamente. La mayor parte de la energía liberada (81 de 88 kilocalorías por mol) refleja la formación de una "jaula" o cápsula de moléculas de agua que envuelven al ion cloruro. Para que la reacción tenga lugar es necesario que las cápsulas sufran, por lo menos, una rotura parcial, de forma que el ion cloruro y la molécula del bromuro de metilo puedan entrar en contacto directo.

Los iones con diferentes razones masa/carga se identifican cambiando la frecuencia del campo eléctrico alterno a que están sometidos. Cuando la frecuencia del generador de señal no es igual a la frecuencia ciclotrónica de un ion, existe poca interacción entre ambas, y la energía del ion y su órbita permanecen esencialmente inalteradas. Sin embargo, cuando la frecuencia de la señal y la frecuencia ciclotrónica son idénticas, entonces existe resonancia y el ion queda acelerado progresivamente, pasando a órbitas de radio creciente. De esta forma, los iones de una razón masa/carga dada resultan acelerados selectivamente, y por ello quedan apartados de todos los demás.

En 1970, cuando trabajaba como estudiante graduado con J. D. Baldeschwieler en la Universidad de Stanford, demostré que el principio de la resonancia ciclotrónica se podía aplicar para identificar iones almacenados en una trampa magnetostática. Esta técnica recibe actualmente el nombre de espectrometría de masas ICR de pulsos. Se forman los iones pasando un breve pulso de un haz electrónico a través de un gas a baja presión, y se almacenan en una célula o cámara analizadora de iones atrapados. Después de una corta demora de segundos, se detectan los productos de la reacción iónica acelerándolos a su frecuencia ciclotrónica aplicando un campo eléctrico alterno. Finalmente, se expulsan todos los iones del analizador con un pulso de paro. La secuencia de pulsos se repite con varios tiempos de demora a fin de descubrir cuán rápidamente se forman los productos iónicos de las diferentes especies. La técnica ICR de pulsos ha sido adoptada en muchos laboratorios de todo el mundo. Permítaseme ahora centrarme en algunos de los hallazgos.

Una de las reacciones clásicas de la química es la de desplazamiento de un átomo, o grupo pequeño de átomos, de una molécula por otro. Tenemos un ejemplo sencillo de ello en la reacción $Cl^- + CH_3Br \rightarrow Br^- + CH_3Cl$, en la cual un ion cloruro (Cl^-) desplaza un bromo (Br) en el bromuro de metilo (CH_3Br), dando cloruro de metilo (CH_3Cl) y un ion bromuro (Br^-). El mecanismo para reacciones de sustitución como éstas se ha elucidado detalladamente; se trata de uno de los tipos de reacción de la química orgánica mejor comprendidos.

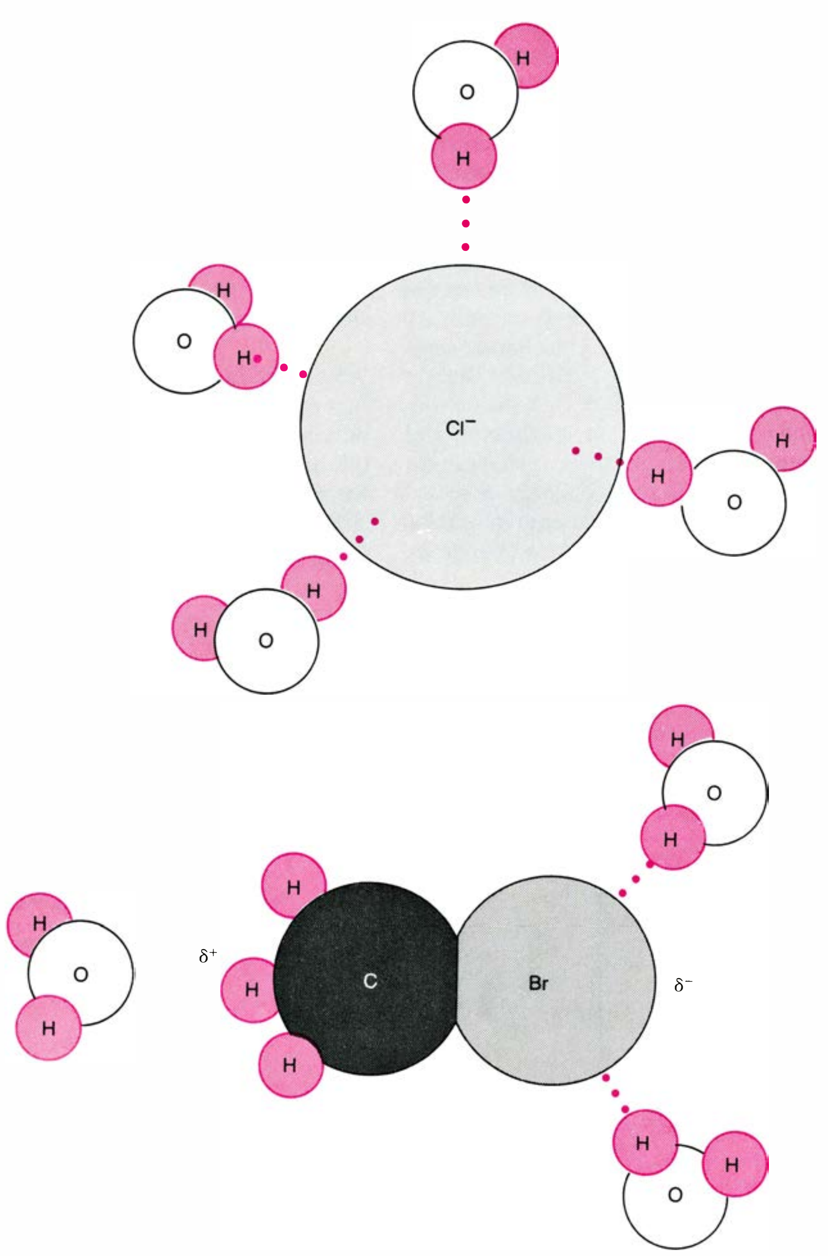
Desde hace tiempo, se sabe que tales reacciones son muy sensibles a la naturaleza del medio solvente en las que se desenvuelven. Empleando agua como disolvente, la reacción entre el ion cloruro y el bromuro de metilo es tan lenta que llega a completarse sólo al cabo de días. Cambiando simplemente el agua por la acetona, la velocidad de reacción aumenta en un factor de un millón; es decir, que la reacción se completa en sólo unas décimas de segundo.

La naturaleza del disolvente puede afectar asimismo los órdenes relativos de reactividad. Por ejemplo, en agua, un ion grande como el ion ioduro (I^-) sufre reacciones de sustitución mucho más rápidamente que un ion pequeño como el ion fluoruro (F^-). En la familia de los halógenos, por regla general, la reactividad aumenta en el orden siguiente: fluoruro, cloruro, bromuro y ioduro. En cambio, cuando el disolvente es la acetona, el orden de reactividad es exactamente el inverso.

Así, de pronto, esos cambios espectaculares causados por los disolventes resultan desconcertantes. Las ecuaciones para las reacciones de sustitución, tal como suelen escribirse, no ofrecen indicio alguno acerca del origen de tales efectos de los disolventes. Ello es debido a que las propias ecuaciones ciertamente nos extravían: no dan indicación alguna del papel que desempeña el disolvente en la reacción. Uno se siente impelido a preguntarse qué ocurriría si se eliminara completamente el disolvente. ¿Llegaría a producirse la reacción en alguna extensión?

Esa cuestión puede responderse mediante la técnica de la espectrometría de masas ICR de pulsos. En fase gaseosa, pueden crearse iones cloruro completamente aislados de moléculas de disolvente dirigiendo un haz de electrones de baja energía contra tetracloruro de carbono (CCl_4), en la misma fase. Tal bombardeo rinde iones cloruro y radicales triclorometilo (CCl_3). Mientras se almacenan los iones cloruro formados en la cámara analizadora de iones atrapados, se añade suficiente bromuro de metilo gaseoso a la misma para aumentar la presión hasta cerca de una diezmillonésima de atmósfera. El resultado es realmente extraordinario: la reacción de sustitución en el bromuro de metilo se efectúa en menos de una décima de segundo. Efectivamente, en fase gaseosa, la reacción del ion cloruro con el bromuro de metilo resulta ser tres mil millones (3×10^9) de veces más rápida que en acetona, y mil billones (10^{15}) más que en agua.

Experimentos subsiguientes en fase gaseosa y en solución han permitido explicar tales enormes diferencias en las velocidades de reacción. La mejor manera de exponerlo es con ayuda de los diagramas de energía potencial [*véase la ilustración de la página precedente*]. La línea ondulante de la parte superior del diagrama muestra cómo, en fase gaseosa, cambia la energía potencial de los compuestos reaccionantes a medida que el ion cloruro se aproxima a la molécula del bromuro de metilo. Inicialmente, la energía potencial disminuye al acercarse las dos partículas entre sí. Esta disminución se



SE DESARROLLAN CAPSULAS DE SOLVATACION alrededor de iones y moléculas en el seno de agua. Las moléculas del disolvente tienden a aislar las especes reaccionantes y dificultan el que éstas puedan entrar en contacto. Estos dibujos esquemáticos muestran las cápsulas alrededor de un ion cloruro (*arriba*) y una molécula de bromuro de metilo (*abajo*). El ion cloruro –que es pequeño y posee una carga negativa localizada– se encuentra más estabilizado por solvatación que el bromuro de metilo, el cual exhibe una carga positiva parcial (δ^+) en las proximidades del grupo metilo y una carga negativa parcial (δ^-) cerca del átomo de bromo. En las cápsulas las moléculas de agua van y vienen continuamente.

debe a las fuerzas eléctricas de atracción entre el ion y la molécula neutra ejercidas a distancias relativamente grandes. De acuerdo con tal atracción, las partículas se aproximan con creciente velocidad hasta que se produce la colisión entre ellas.

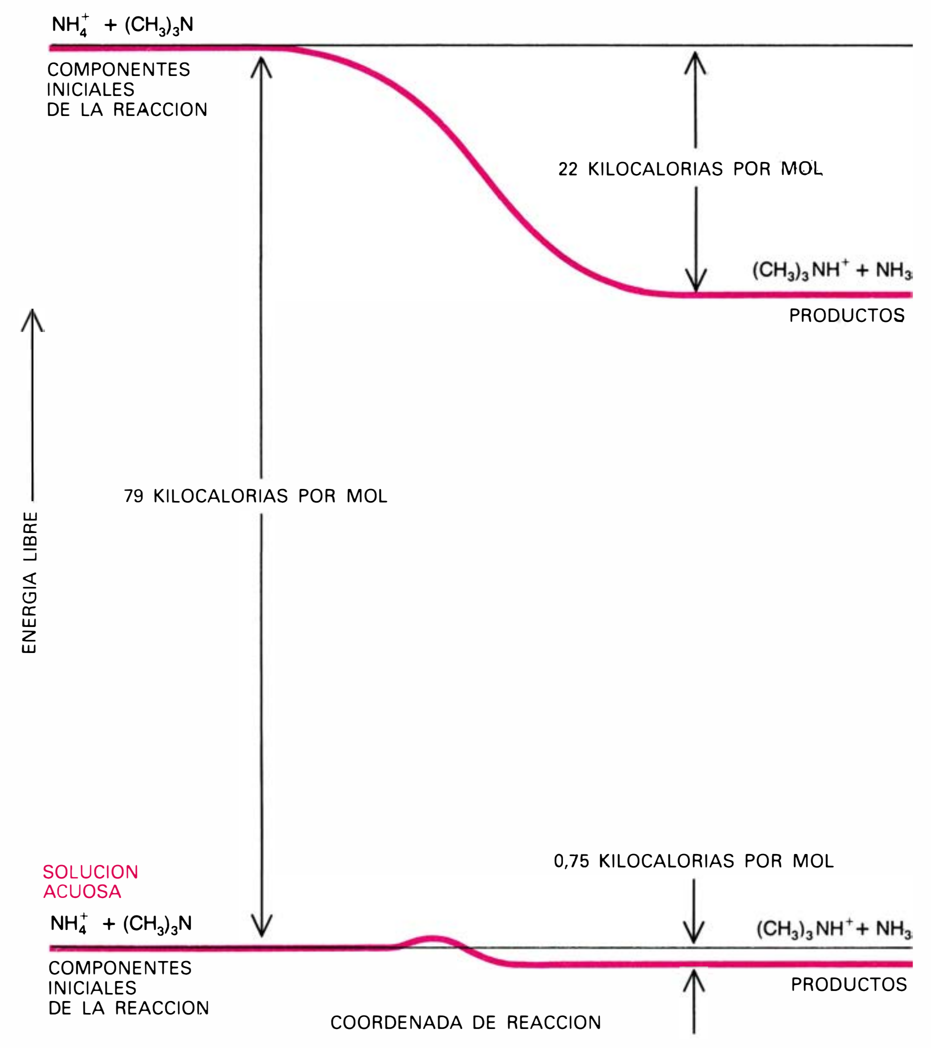
En el momento de la colisión, el complejo constituido por el ion cloruro y la molécula del bromuro de metilo posee una energía interna de unas 11 kilocalorías por mol, resultando más estable que aquellas partículas cuando se encuentran separadas. A fin de que pueda tener lugar la sustitución del bromuro por el ion cloruro, el conjunto de las especies reaccionantes debe sobrepasar una barrera de energía potencial casi tan elevada como la energía de enlace del complejo. Cerca de un 1 por ciento de tales complejos superan la barrera, dando los productos de reacción Br^- y CH_3Cl; en cambio, el 99 por ciento se escinden, regenerando las especies de partida. En consecuencia, la velocidad de sustitución observada en fase gaseosa es alrededor de un 1 por ciento de aquella que corresponde al número de colisiones entre el ion cloruro y el bromuro de metilo.

Cuando la reacción de sustitución ocurre en solución acuosa, la curva de energía potencial posee un aspecto totalmente diferente. En primer lugar, sus puntos se sitúan marcadamente por debajo, puesto que cuando se transfieren el ion cloruro y el bromuro de metilo de la fase gaseosa a fase acuosa se liberan unas 88 kilocalorías por mol. La mayor parte de su totalidad –81 kilocalorías por mol– se aplican a estabilizar el ion cloruro con las moléculas del disolvente. El agua es efectivamente un medio solvente especialmente bueno para los iones. Posee una alta constante dieléctrica (es decir, es un buen aislante), un elevado momento dipolar (lo que significa que las cargas positivas y negativas están ampliamente separadas) y la propiedad de formar enlaces de hidrógeno.

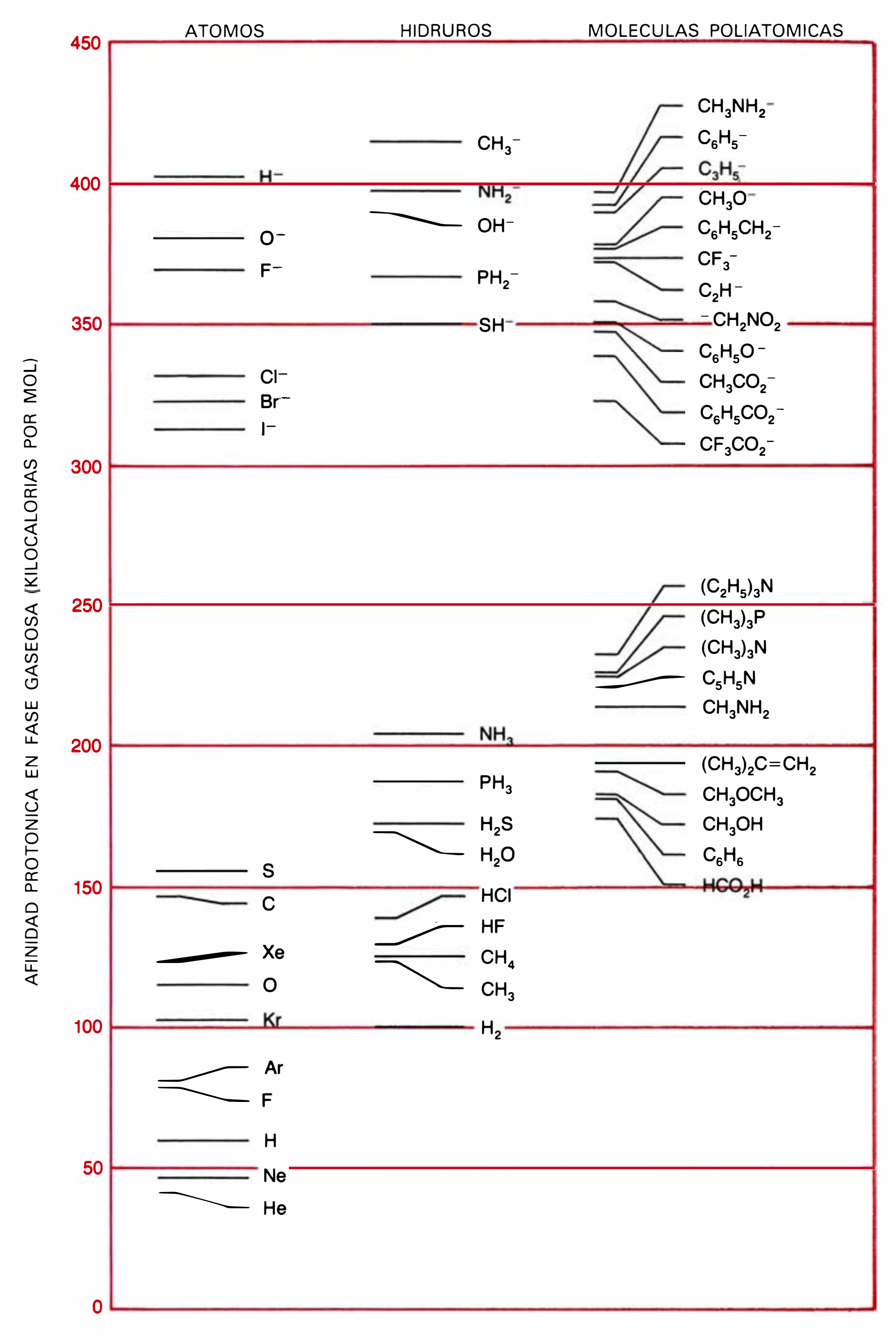
Tanto el ion cloruro como la molécula neutra, una vez disueltos en agua, se hallan apretadamente encerrados en una "jaula" o cápsula de moléculas de agua que atenúa grandemente las fuerzas eléctricas de atracción inductoras de su colisión en fase gaseosa. Antes de que el ion cloruro y el bromuro de metilo lleguen a ponerse en contacto, las cápsulas de solvatación en que están encerradas las dos especies reaccionantes deben sufrir destrucción, por lo menos en parte. Por consiguiente, la velocidad de reacción queda determinada principalmente por la cantidad de energía necesaria para romper las cápsulas de solvatación. La resistencia a tal ruptura representa una barrera de energía potencial de unas 25 kilocalorías por mol, suficientemente elevada para reducir la velocidad de reacción en agua en 15 órdenes de magnitud respecto de aquella en fase gaseosa.

Otro enfoque para comprender la baja velocidad de reacción en agua consiste en comparar las energías de solvatación de las especies reaccionantes y del estado de transición; es decir, del aludido complejo formado entre el ion cloruro y el bromuro de metilo: $(Cl\cdots CH_3\cdots Br)^-$. El estado de transición es, por definición, el punto más elevado de la curva de la energía potencial entre las especies reaccionantes y sus productos. Entonces la barrera se eleva porque las especies reaccionantes están más estabilizadas por solvatación que el propio estado de transición. En general, los iones que, como el ion cloruro, son pequeños y poseen una carga eléctrica localizada resultan más estabilizados por el agua que las estructuras mayores, por ejemplo el $(Cl\cdots CH_3\cdots Br)^-$), en el cual la carga se distribuye entre varios átomos.

Las velocidades de reacción en otros disolventes pueden razonarse análogamente por las diferencias de solvatación entre las especies reaccionantes y los estados de transición correspondientes. La reacción del ion cloruro con



ACIDEZ Y BASICIDAD RELATIVAS DE LOS ATOMOS Y LAS MOLECULAS, afectadas fuertemente por la presencia o la ausencia de disolvente. Los ácidos se definen ampliamente como aquellas sustancias que rinden protones en el decurso de una reacción; las bases, como aceptores de protones. Las dos curvas se refieren a la reacción en la que el ion amonio, NH_4^+ –un ácido–, transfiere un protón a la trimetilamina, $(CH_3)_3N$, que constituye una base. En fase gaseosa (*curva superior*), los productos $(CH_3)_3NH^+$ y NH_3 son 22 kilocalorías por mol más estables que las especies iniciales. Sin embargo, cuando la reacción transcurre en solución acuosa (*curva inferior*), la diferencia energética entre las especies iniciales y los productos disminuye en menos de una kilocaloría por mol en virtud de que la solvatación del ion NH_4^+ por enlaces de hidrógeno es preferente. En equilibrio y en fase gaseosa, la concentración del ion amonio NH_4^+ es 10^5 veces menor que aquélla en solución acuosa y en equilibrio.



UNA ESCALA DE AFINIDADES PROTONICAS muestra la cantidad de energía liberada cuando un protón se combina en fase gaseosa con determinadas especies atómicas o moleculares. Por ejemplo, cuando H^- –en el extremo superior de la escala– se combina con un protón dando H_2 se liberan cerca de 400 kilocalorías por mol. Cuando el helio, He, se combina con un protón, se liberan solamente 43 kilocalorías por mol. La escala indica asimismo la basicidad relativa de las moléculas poliatómicas en fase gaseosa. Las bases más fuertes se hallan en la parte superior de la escala porque son las que tienen mayor afinidad por un protón. Las bases más débiles se encuentran en la parte inferior de la escala.

el bromuro de metilo transcurre mucho más rápidamente en acetona que en agua porque estas especies no se encuentran tan fuertemente solvatadas. La acetona está considerada como un disolvente aprótico dipolar debido a su incapacidad de formar enlaces de hidrógeno; así y todo, posee un momento dipolar suficientemente elevado para estabilizar iones en su seno. En acetona no pueden formarse cápsulas de solvatación que envuelvan los iones tan fuertes y, por consiguiente, las reacciones en tal disolvente tienden a parecerse a aquellas que transcurren en fase gaseosa.

El concepto de ácido y base es uno de los más antiguos y útiles de la química. Las actuales definiciones de ácido y de base se remontan al año 1923, cuando Johannes N. Brönsted y Thomas M. Lowry definieron un ácido como cualquier sustancia que cede un protón, y una base como cualquier sustancia que lo acepta. Las reacciones de transferencia de protón son especialmente importantes en agua, puesto que ésta puede actuar como ácido y como base. En las reacciones con un ácido fuerte, como el cloruro de hidrógeno, el agua puede aceptar un protón rindiendo el ion hidronio, H_3O^+, al mismo tiempo que suelta un ion cloruro, Cl^-. Por otro lado, en las reacciones con una base como el amoníaco (NH_3) es el agua la que cede el protón para formar el ion amónico, NH_4^+, dando ion hidróxido, HO^-. Se han elaborado extensas tablas que muestran la relativa acidez y basicidad de centenares de compuestos. Con ellas se pueden predecir los productos de una reacción de transferencia de protón y calcular cuánta energía debiera liberarse en el proceso.

La mayoría de las reacciones ácido-base implican iones. Puesto que los iones interaccionan fuertemente con el medio solvente, uno desearía conocer cómo estas reacciones quedan afectadas por la solvatación. En particular, cabría preguntarse ¿en qué difieren las propiedades ácido-base de las moléculas sin solvatar de aquéllas solvatadas?

Recientemente se ha progresado con rapidez en lo referente a la comprensión de cómo la solvatación influye en la acidez y la basicidad. Tales avances han sido debidos principalmente a la espectrometría de masas ICR de pulsos y a otras técnicas que permiten medir las constantes de equilibrio de las reacciones de transferencia de protón en fase gaseosa. Considérese una reacción en la cual el ion amonio, NH_4^+, un ácido, transfiere un protón a la trimetilamina, una base. En agua, la reacción rinde rápidamente el ion trimetilamonio, $(CH_3)_3NH^+$, y amoniaco; pero la reacción inversa también tiene lugar a una velocidad no despreciable, puesto que la barrera energética que impide la reacción inversa es bastante baja. Cuando la velocidad de la reacción inversa se hace igual a la velocidad de la reacción en sentido directo, entonces se alcanza el equilibrio. Las medidas de la constante de equilibrio –que es el cociente entre la proporción de productos de reacción y aquélla de los componentes de partida cuando el equilibrio está establecido– muestra que en solución acuosa la trimetilamina es una base ligeramente más fuerte que el

amoniaco. Una conclusión razonable es que la sustitución de tres hidrógenos por otros tantos grupos metilo ($- CH_3$) causa sólo un ligero aumento de la basicidad.

Hace unos pocos años se midió en fase gaseosa, en ausencia de solvatación, la basicidad relativa entre el amoniaco y la trimetilamina mediante la técnica ICR de pulsos. Los resultados fueron espectacularmente diferentes de aquellos obtenidos en solución acuosa. En agua, los productos de la reacción son más estables que los componentes iniciales de la reacción en menos de 1 kilocaloría por mol; en fase gaseosa, los productos son más estables en 22 kilocalorías [*véase la ilustración de la página 110*]. Ello significa que, en fase gaseosa y en equilibrio, la concentración de ion amonio, NH_4^+, es menor en un factor de 10^{15} que en solución acuosa.

A fin de explicar los enormes efectos de la solvatación, permítaseme referirme primero a los resultados en fase gaseosa y luego a cómo se modifican cuando la reacción transcurre en solución acuosa. La primera pregunta será consiguientemente ¿por qué la trimetilamina es una base tan fuerte en fase gaseosa? Varios investigadores han demostrado que la sustitución de los hidrógenos por metilos apenas influye en la estabilidad de las moléculas de amina neutras, pero en cambio aumenta mucho la estabilidad de sus derivados iónicos. Los grupos metilo estabilizan el ion trimetilamonio, $(CH_3)_3NH^+$, de dos maneras. Primera, existe un efecto "inductivo" que tiende a ceder electrones y, por ello, a desplazar hacia la carga positiva del átomo de hidrógeno la densidad electrónica de los enlaces químicos. Segunda, los grupos metilo poseen mayor tamaño que los átomos de hidrógeno, y por ello se polarizan por la influencia de la carga positiva. El campo eléctrico de esta carga penetra en la región del espacio próxima a la molécula y distorsiona las nubes electrónicas de los grupos metilo. Tanto el efecto inductivo como el de polarización hacen al ion $(CH_3)_3NH^+$ mucho más estable que el ion NH_4^+, en el cual tales efectos están ausentes. En consecuencia, la trimetilamina posee una afinidad para el protón muchísimo mayor que el amoniaco.

Consideremos ahora lo que le ocurre a la misma reacción en presencia de agua. Evidentemente, alguna causa interviene que debilita grandemente la acción estabilizante intrínseca de los grupos metilo. El análisis termodinámico muestra que las moléculas de amoniaco no ionizadas y las de la trimetilamina se encuentran solvatadas por el estilo. Por tanto, los cambios principales en la reacción se deben a la solvatación de los iones: el NH_4^+ está mucho más fuertemente solvatado que el $(CH_3)_3NH^+$. Existen varias razones para ello.

Probablemente, la razón más importante es que el NH_4^+ puede estabilizarse formando cuatro enlaces de hidrógeno primarios con las moléculas de agua que lo envuelven, mientras que el $(CH_3)_3NH^+$ posee sólo un hidrógeno ácido y, por ello, puede formar solamente un enlace de hidrógeno. Los enlaces de hidrógeno son muy importantes en cuanto a la estabilización de los iones en un disolvente como el agua, contribuyendo en este caso a estabilizaciones desde cinco a 10 kilocalorías por mol. Cuando las moléculas del disolvente se apiñan alrededor de un ion, el efecto de la polarizabilidad del grupo metilo queda muy atenuado, puesto que la carga eléctrica se distribuye entre varias moléculas del disolvente. Parte de la diferencia entre las energías de solvatación puede atribuirse asimismo a los distintos tamaños de los iones. Por ejemplo, el mayor tamaño de los grupos metilo en el ion $(CH_3)_3NH^+$ aparta las moléculas del disolvente del mismo, dificultando el que puedan hallarse suficientemente próximas para solvatarlo.

Durante los seis últimos años se ha medido en fase gaseosa la acidez y la basicidad de más de 300 compuestos. Los resultados alcanzados se muestran en una tabla de "afinidad protónica" y dan la energía liberada cuando un protón (H^+) se combina con una base (B) para rendir un ion cargado positivamente (BH^+). Si resulta que B es una base neutra, como el amoniaco, la reacción da ion amonio, NH_4^+, y libera la energía de 205 kilocalorías por mol. En cambio, si B es un ion negativo, como el ion cloruro, Cl^-, la reacción rinde cloruro de hidrógeno neutro (HCl) y 333 kilocalorías por mol.

Los experimentos en fase gaseosa suministran muchos ejemplos en los que las afinidades protónicas difieren sustancialmente de aquellas otras medidas en solución. Por ejemplo, en fase gaseosa, el ion hidróxido, HO^-, es más fuerte que el ion bencilo $C_6H_5CH_2^-$. Esto significa que en una reacción en la que estas dos especies compitan por un protón, éste será capturado por el ion hidróxido, convirtiéndose en agua. Consecuencia de ello es que en fase gaseosa la reacción del HO^- con tolueno ($C_6H_5CH_3$) transcurre rápidamente, con liberación de energía, dando $C_6H_5CH_2^-$ y H_2O. En solución acuosa, la reacción ocurre en sentido opuesto: se transfiere un protón desde el agua al ion bencilo, convirtiéndose éste en tolueno.

El papel de los disolventes en química –desde hace tiempo una cuestión nebulosa– se está aclarando merced a los experimentos del tipo I aquí descritos. Ahora es posible medir cuantitativamente las diferencias de reactividad entre moléculas solvatadas y la reactividad intrínseca de las no solvatadas. Se están mejorando constantemente técnicas especiales, como la ICR de pulsos, a fin de alcanzar un marco más amplio de reacciones. Un desarrollo digno de mención es la habilidad de generar en fase gaseosa iones parcialmente solvatados, tales como el $Cl^- \cdots (H_2O)_2$; es decir, un ion cloruro unido a dos moléculas de agua. Disponiendo unas pocas moléculas de disolvente alrededor de un ion, los experimentos en fase gaseosa permitirían simular los efectos "jaula" (o cápsula) de los disolventes, tan importantes en solución. Otro desarrollo útil es el extender la técnica ICR de pulsos al estudio de reacciones de moléculas biológicas de baja volatilidad. En nuestro laboratorio, hemos medido recientemente la acidez y la basicidad en fase gaseosa del aminoácido más sencillo: la glicina (NH_2-CH_2-COOH). En solución acuosa, la glicina se encuentra en forma de un "zwitterion", o ion híbrido, caracterizado por encontrarse una carga positiva en un extremo de la molécula y otra negativa en el extremo opuesto: $NH^+{}_3$-CH_2-COO^-. En cambio, encontramos que en fase gaseosa la glicina existe como una molécula no iónica.

Se han hallado en las propiedades ácido-base de los aminoácidos efectos enormes de solvatación. La elucidación de tales propiedades debiera contribuir sustancialmente al conocimiento del comportamiento de los aminoácidos en los organismos vivos. Por ejemplo, sería posible hablar en términos cuantitativos acerca de cómo cambian las propiedades de los aminoácidos cuando se trasladan desde un entorno acuoso, dentro de una célula viva, a otra parte de una molécula enzimática o de una membrana celular con un entorno hidrófugo; es decir, que repela el agua.

Juegos matemáticos

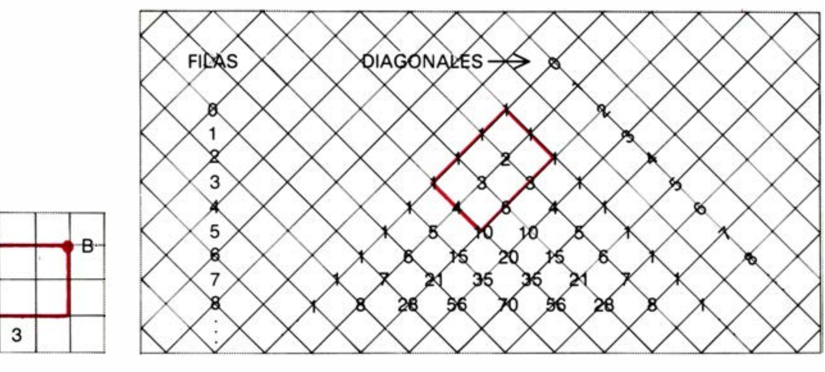
La taxigeometría nos ofrece viajes gratis hasta locales no euclídeos

Martin Gardner

Modificando uno o varios postulados de la geometría euclídea podemos construir toda suerte de extrañas geometrías, tan libres de contradicciones y tan coherentes desde el punto de vista lógico como la geometría métrica plana que solía enseñarse en el bachillerato. Algunas de estas geometrías no euclídeas han resultado enormemente útiles en la física y la cosmología modernas; no obstante, es imposible visualizar la estructura de las dos más importantes, llamadas geometría elíptica y geometría hiperbólica. Por ello, a casi todos los profanos estas geometrías les resultan demasiado difíciles, estándoles vedado investigar en su estructura, descubrir nuevos teoremas o trabajar en problemas no euclídeos interesantes.

Este mes echaremos una ojeada no muy profunda a un tipo enteramente distinto de geometría no euclídea, tan sencilla de comprender que cualquier persona, explorando su estructura con ayuda de una cuartilla de papel cuadriculado, podría tener la emoción de lograr nuevos teoremas. Esta geometría podría llamarse geometría de la cuadrícula, y, también, "geometría de los taxistas", pues podemos visualizarla imaginando una ciudad cuyas calles formasen un cuadriculado de manzanas de lado unidad, recorridas por taxis en busca de pasajeros. En muchos aspectos, esta geometría taxi-métrica, o taxigeometría, es curiosamente parecida a la geometría plana ordinaria, y, por otra, es lo suficientemente distinta como para que su exploración resulte muy entretenida. Además, tal exploración nos hace intuir con fuerza cuánto, y en qué inesperadas formas pueden diferenciarse de la euclídea otras geometrías, que pese a ello originan sistemas formales enteramente coherentes desde el punto de vista lógico.

Que yo tenga noticia, la geometría de la cuadrícula fue propuesta por primera vez por Hermann Minkowski, matemático nacido en Rusia, y que fue en Zurich profesor de un joven llamado Einstein. Más tarde, Minkowski dio a la teoría especial de la relatividad su elegante formulación actual, recurriendo a un sistema geométrico de cuatro dimensiones, tres para el espacio y una para el tiempo. Los gráficos espaciotemporales tan ampliamente utilizados en teoría de relatividad han sido bautizados en honor de Minkowski. A punto de concluir el siglo pasado, Minkowski publicó en Alemania sus *Gesammelte Abhandlungen* (Chelsea Publishing Company hizo una reimpresión en 1967), donde analizaba diversidad de sistemas métricos: espacios topológicos formados por conjuntos bien definidos cuyos elementos se llaman "puntos", dotados de reglas para calcular la "distancia" entre dos puntos cualesquiera pertenecientes a ellos.



Forma de utilizar el triángulo de Pascal para contar taxicaminos

La geometría de la cuadrícula es un sistema métrico donde los puntos son las intersecciones de las líneas horizontales y verticales de una cuartilla cuadriculada, o si se quiere, los cruces de las calles de nuestra ciudad ideal. Si dos puntos *A* y *B* se encuentran en distintos cruces de una misma calle, la distancia entre ellos se mide igual que en la geometría euclídea, contando el número de bloques unitarios que separan un punto de otro. Sin embargo, cuando *A* y *B* no se encuentran en la misma calle, la distancia entre ellos se mide, no mediante el teorema de Pitágoras, sino contando el número de manzanas de casas que debería recorrer un taxi para ir desde *A* hasta *B* (o viceversa) por el trayecto más corto posible. Aunque no hay dificultad en formalizar de diversos modos la geometría de la cuadrícula, enunciando las definiciones y postulados pertinentes, aquí dejaremos de lado los tecnicismos y nos limitaremos a exponerla con argumentos intuitivos.

En la geometría euclídea la distancia mínima entre dos puntos (a vuelo de pájaro) define una única línea recta. En la geometría del taxista pueden existir muchos caminos, todos ellos igualmente mínimos, que conecten dos puntos. En lo sucesivo, el término "camino" se empleará para denominar a cada uno de los recorridos del taxi que enlacen ambos puntos con mínimo kilometraje.

Cuando dos puntos no se encuentran en la misma calle, ¿cuántos caminos distintos los conectan? El famoso triángulo de Pascal (que en España suele llamarse triángulo de Tartaglia) nos ayudará a resolver esta cuestión. Imaginemos que los puntos *A* y *B* se encuentran en vértices opuestos de un rectángulo de dos cuadros por tres, como vemos en la parte izquierda de la ilustración de esta página. Las líneas de color de la ilustración de la parte derecha muestran cómo dibujar el rectángulo sobre el triángulo de Pascal a fin de resolver el problema. El vértice inferior del rectángulo señala la solución: entre *A* y *B* hay 10 caminos diferentes. Debe observarse que el triángulo de Pascal es simétrico respecto a un eje que pase por su vértice. Por este motivo, es indiferente que al dibujar el rectángulo éste quede adosado a uno u otro lado del triángulo; la solución será la misma. (Recordemos que en el triángulo de Pascal cada número es suma de los dos situados sobre él. Puede verse más acerca del triángulo de Pascal en el capítulo 15 de mi *Mathematical Carnival,* publicado por Alfred A. Knopf, Inc., en 1975.)

Los lectores ya familiarizados con la combinatoria recordarán que el triángulo de Pascal permite hallar en un instante de cuántas maneras puede seleccionarse una colección de n objetos en un conjunto formado por r objetos.

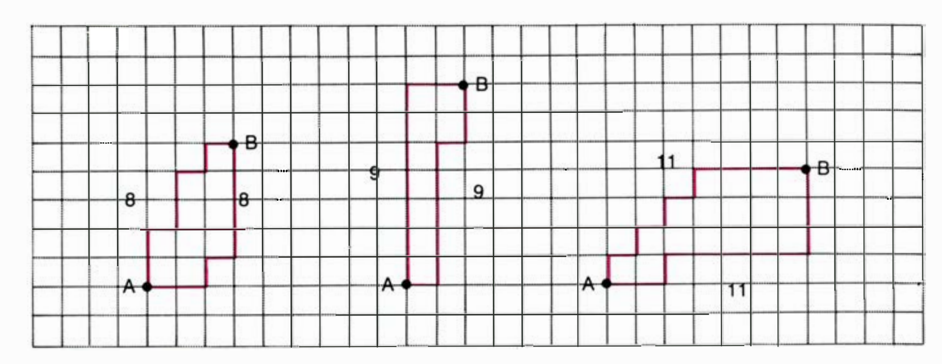
A la solución se llega intersecando la n-ésima diagonal y la r-ésima fila del triángulo. En el caso del problema del taxi, resulta que 10 es el número de formas en que pueden seleccionarse dos objetos de entre un conjunto de cinco. El dos corresponde a uno de los lados de nuestro rectángulo de calles, mientras que el cinco es la suma de sus dos lados. También es diez el número de recorridos mínimos que el taxi puede realizar para ir desde un ángulo de un rectángulo de 3 por 2 hasta el ángulo opuesto sobre su diagonal.

No es necesario dibujar el triángulo de Pascal para determinar el número de caminos en la geometría de la cuadrícula. Podemos servirnos también de una conocida fórmula, que permite hallar el número N de formas de elegir n objetos de entre un total de r objetos: $N = r!/(n!(r - n)!)$. Por ejemplo, en nuestro problema particular $r!$ es igual a $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5$, es decir, a 120; $n!$ es 1×2, o sea, 2, y $(r - n)!$ equivale a $1 \times 2 \times 3$, o sea, 6, con lo que la fórmula anterior se reduce a $N = 120/12$, o sea, 10.

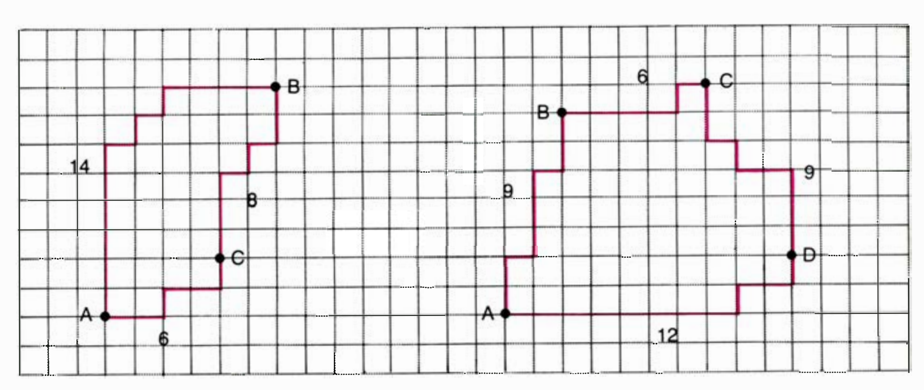
El hecho de poder adosar el rectángulo a cualquiera de los lados del triángulo de Pascal es forma gráfica de expresar que el número de maneras de seleccionar n objetos, de entre un conjunto mayor, de r objetos, es igual al número de formas de seleccionar $r - n$ objetos en ese mismo conjunto. Hecho que intuitivamente es obvio, pues al mismo tiempo que se separa un conjunto de n objetos de un total de r queda segregado otro conjunto, formado por los $r - n$ objetos restantes. Traducido a la cuadrícula, ello significa que, al trazar un rectángulo euclídeo sobre el reticulado, el número de caminos distintos que enlazan dos vértices diagonalmente opuestos es igual al de los que conectan el otro par de vértices.

Dado que las líneas "rectas" (los caminos más cortos) de la taxigeometría pueden ser líneas quebradas en la geometría euclídea, la noción de "ángulo", o bien carece de sentido, o bien deberá adquirir en este nuevo sistema una significación enteramente distinta. Empero, es posible definir figuras que remedan de cerca los polígonos euclídeos, e incluso "biángulos", de sólo dos lados, que serían absurdos en la geometría euclídea. En la ilustración superior vemos algunos ejemplos de biángulos. Debería ser evidente que, aunque pueden existir biángulos distintos que compartan un mismo par de "vértices", los "lados" de estos biángulos tienen que medir lo mismo, pues conectan un mismo par de puntos.

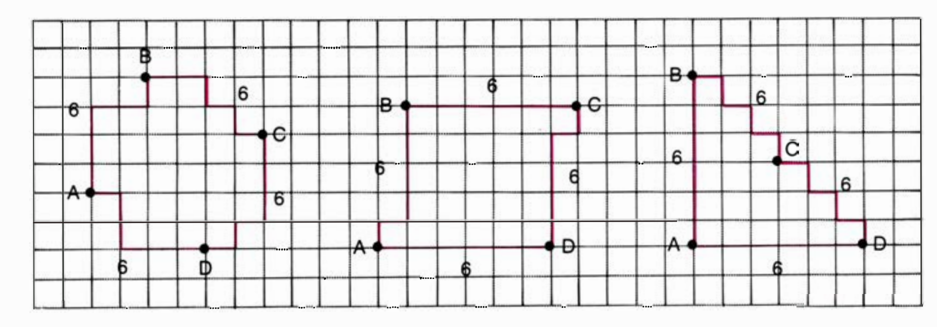
Podemos ver en la parte izquierda de la segunda ilustración de esta página un triángulo escaleno de vértices A, B, C cuyos lados miden 14, 8, 6. Los lados de los polígonos "taximétricos" tienen que ser, desde luego, taxicaminos; los lados que componen un



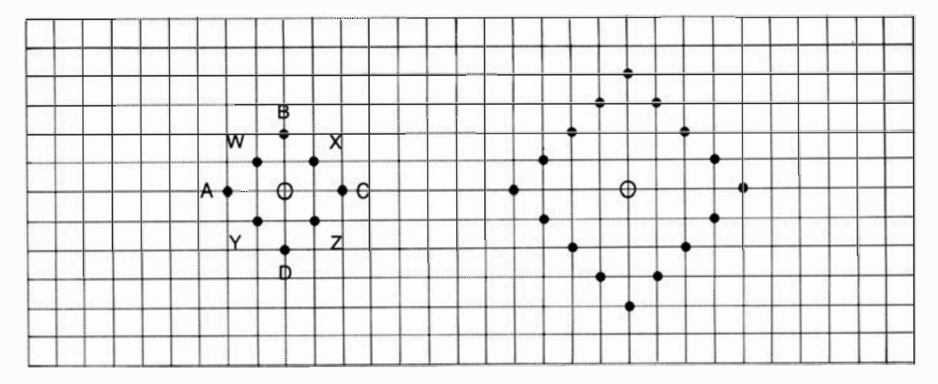
Biángulos taxigeométricos



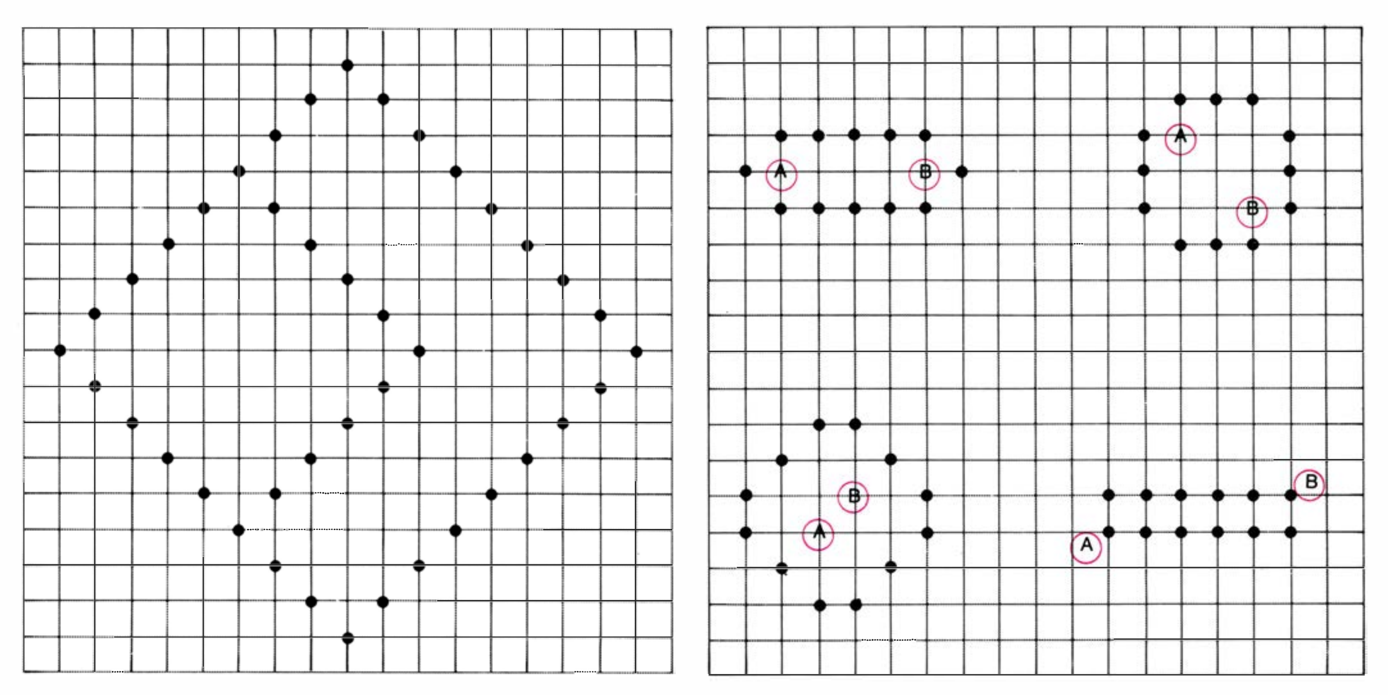
Triángulo escaleno taxigeométrico **(izquierda)**. *Cuadrilátero* **(derecha)**



Cuadrados taxigeométricos de lado 6



Circunferencias de radios 2 **(izquierda)** *y 4* **(derecha)**



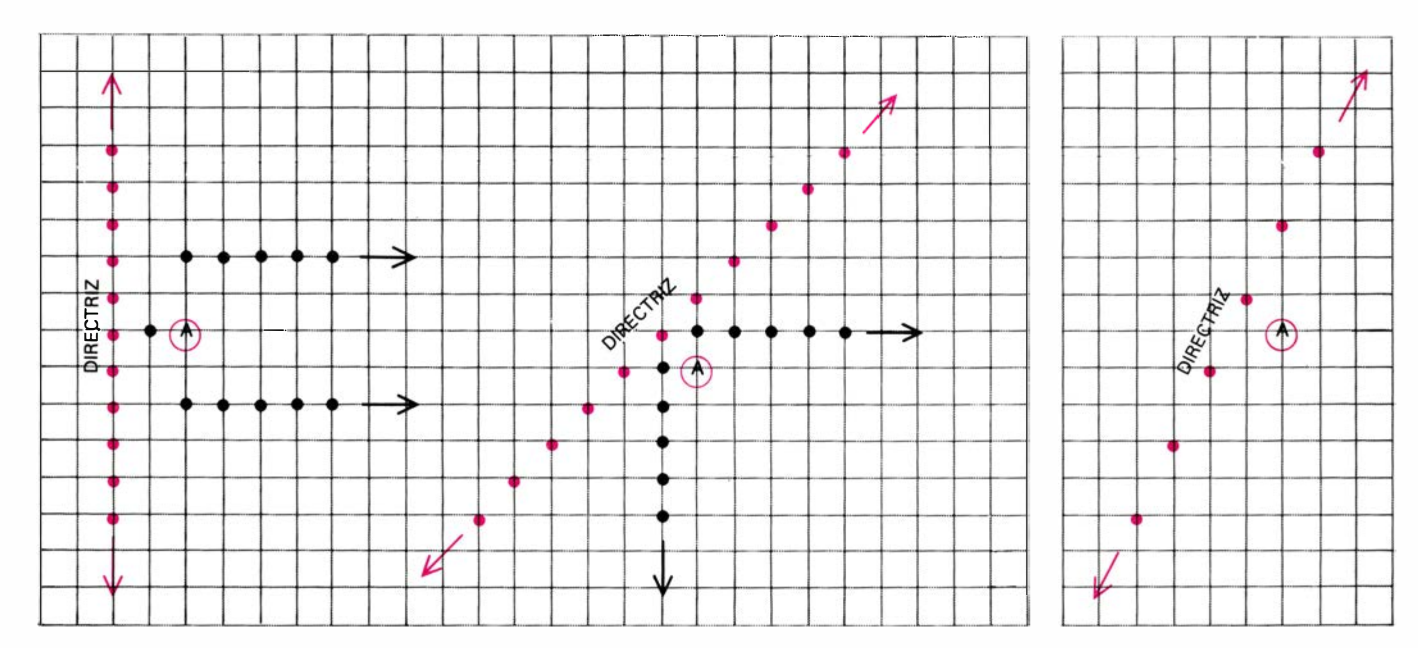
Dos circunferencias taxigeométricas que se cortan en 11 puntos

Elipses taxigeométricas de suma constante 6, formadas por 12 puntos

polígono de dimensiones dadas pueden variar de forma, pero no de longitud. Notemos que el triángulo de la figura viola el teorema euclídeo que afirma que la suma de dos lados cualesquiera de un triángulo tiene que ser mayor que el lado restante. En nuestro caso, la suma de dos lados es igual al tercero: 6 + 8 = 14. En la parte derecha de la ilustración tenemos un taxicuadrilátero de lados 9, 6, 9 y 12.

La tercera figura, empezando por arriba, muestra tres "cuadrados", todos de seis unidades de lado. Tan sólo el dibujado a la izquierda cumple el teorema euclídeo sobre igualdad de las diagonales. Como estas figuras hacen ver, los cuadrados taximétricos pueden tener innumerables formas euclídeas.

Es fácil definir circunferencias en la taxigeometría, mas el resultado tiene mucho de inesperado. Al igual que en la geometría euclídea, las circunferencias son, por definición, lugares geométricos de puntos situados a una misma distancia de un punto dado. Supongamos que tal distancia sea 2. La circunferencia resultante está formada por los ocho puntos que vemos en la figura izquierda de la ilustración inferior de la página anterior –¿quién dijo ser imposible la cuadratura del círculo? Observemos que el centro O y cada uno de los puntos A, B, C y D están conectados por sólo un radio, mientras que a cada uno de los puntos restantes van dos. No es difícil demostrar que toda taxicircunferencia de radio entero r está formada por $4r$ puntos y tiene un perímetro de longitud $8r$. La definición euclídea de pi es la relación entre la longitud de la circunferencia y su diámetro. Si adoptásemos esta definición, el valor del "taxi-pi" sería exactamente 4.

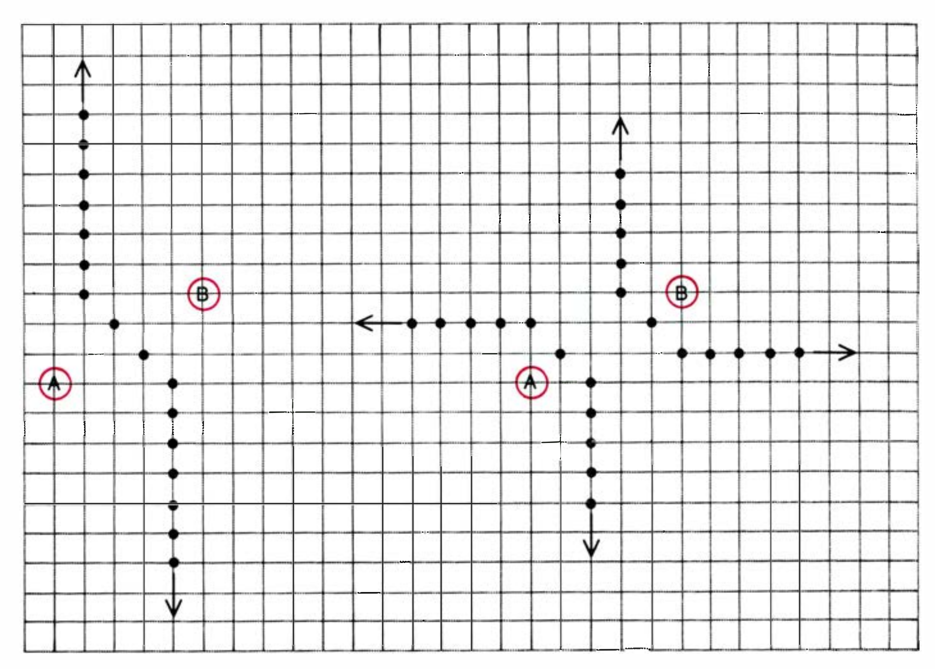


Parábolas taxigeométricas con foco en **A**

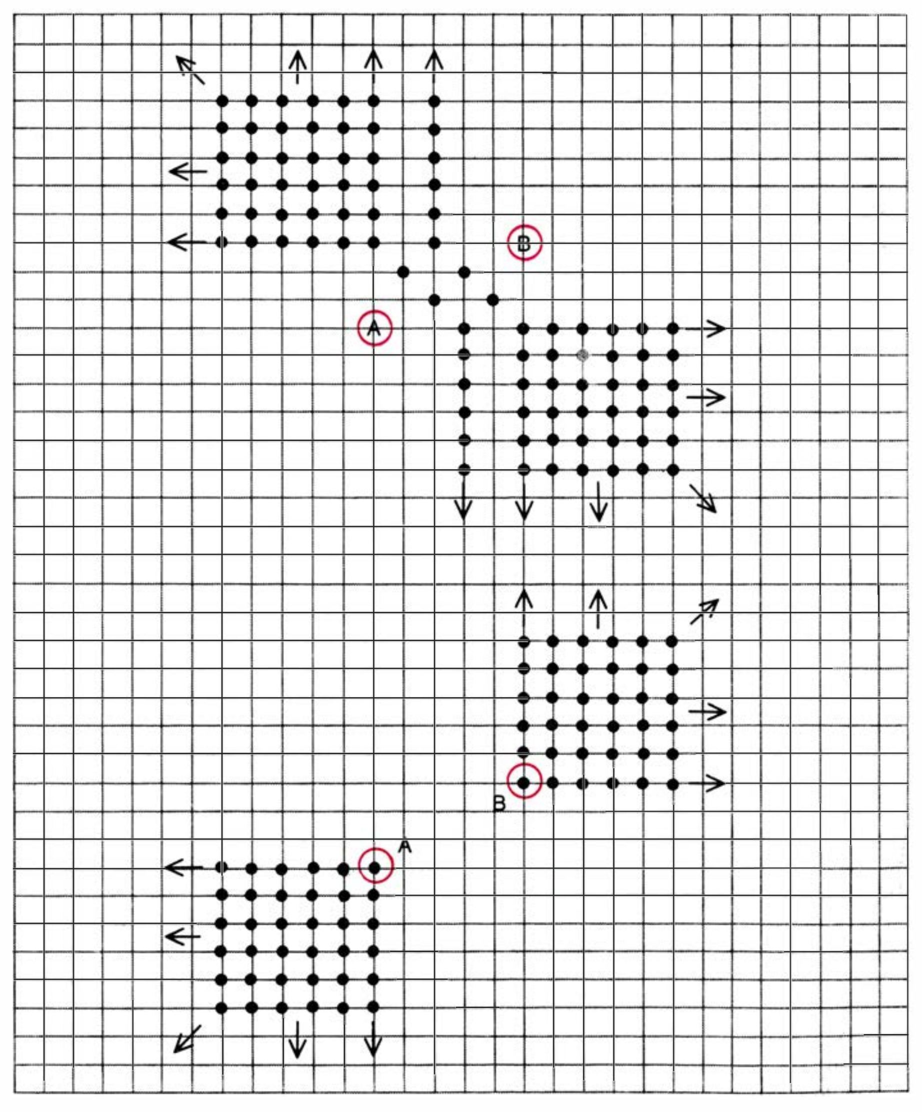
Notemos que nuestra circunferencia contiene colecciones de vértices de "taxi-polígonos inscritos" de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 lados. Por ejemplo, tenemos así el biángulo *D, X,* el triángulo equilátero *B, C, D,* el cuadrado *A, B, C, D,* el pentágono regular *A, W, X, Z, Y,* el hexágono regular *A, W, B, X, Z, Y,* y el heptágono regular *A, W, X, C, Z, D, Y.* Finalmente, los ocho puntos de la circunferencia coinciden con los vértices de un conjunto de octógonos regulares.

Otro teorema euclídeo que la taxigeometría no respeta afirma que dos circunferencias nunca pueden cortarse en más de dos puntos. Como muestra la ilustración superior izquierda de la página opuesta, el número de puntos de intersección de dos taxicircunferencias puede ser tan grande como se desee. Cuanto mayores sean las circunferencias, en más puntos pueden interceptarse entre sí. Experimentando un poco es fácil conseguir excelentes analogías taximétricas de las otras tres secciones cónicas. La ilustración superior derecha de la página opuesta muestra cuatro "elipses" de 12 puntos cada una. Lo mismo que en la euclídea, en la geometría de la cuadrícula la elipse es el lugar de los puntos cuyas distancias a dos puntos fijos *A* y *B,* llamados focos, suman siempre lo mismo. Los puntos fijos, los focos, están marcados en la ilustración con circulitos de color, y en los cuatro ejemplos dibujados la suma constante vale 6.

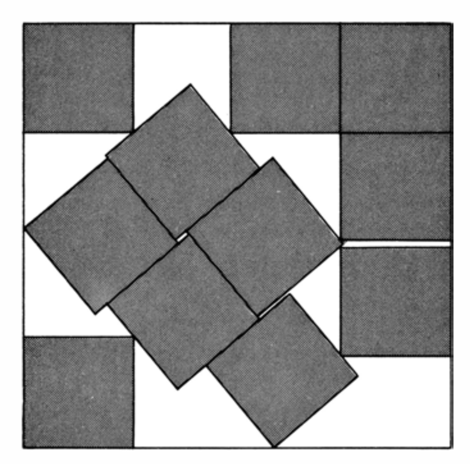
La cuarta curva es en realidad una elipse degenerada, análoga del segmento rectilíneo que resulta en geometría euclídea cuando la suma constante que define la elipse es igual a la distancia entre los focos. Cuando se presenta este caso en la taxi-geometría, si *A* y *B* yacen en la misma calle, resulta una elipse reducida a un segmento de puntos alineados. De no ser así, la elipse estará formada por todos los puntos del retículo que se encuentren en el interior de un rectángulo euclídeo cuyos vértices diagonalmente opuestos sean *A* y *B*. Por ejemplo, supongamos que *A* y *B* sean vértices opuestos de un cuadrado cuyos lados sean líneas del retículo, de longitud 4. En tal caso, la distancia "en taxi" entre *A* y *B* es 8, y para cada uno de los 25 puntos del cuadrado, la suma de distancias a *A* y *B* es 8. Estos 25 puntos formarán una elipse degenerada de suma constante 8, con focos situados en *A* y en *B*. Lo mismo que en geometría euclídea, conforme crece la razón entre la suma constante y la distancia



Hipérbolas de diferencia constante igual a 0 **(izquierda)** *e igual a 4* **(derecha)**



Hipérbolas de diferencia constante igual a 2 **(arriba)** *e igual a 8* **(abajo)**



Un mejor empaquetamiento de 11 cuadrados unitarios

entre los focos la elipse se va haciendo más "circular". Si A y B llegan a coincidir, entonces, de nuevo, la elipse se convierte en una circunferencia, como sucede en el plano euclídeo.

La parábola euclídea es el lugar geométrico de puntos cuya distancia a un punto A es igual a su mínima distancia a una línea recta fija, llamada directriz. Podemos también construir parábolas taximétricas tomando como "directrices" conjuntos ilimitados de puntos alineados en sentido euclídeo. En la parte izquierda de la ilustración inferior de la página 116 podemos ver dos parábolas. Pruebe el lector a trazar la parábola correspondiente al foco y directriz de la figura de la derecha. El mes que viene daré la solución de este ejercicio, un poquito más delicado de lo que puede parecer.

En la geometría de la cuadrícula, las hipérbolas son más complicadas. La hipérbola euclídea es el lugar de todos los puntos cuya diferencia de distancias a un par de focos, A y B, es constante. El aspecto de una taxi-hipérbola puede variar considerablemente conforme se modifican sus parámetros fundamentales. En la figura de la izquierda de la ilustración superior de la página anterior se han situado los focos A y B de forma que se presente el caso límite, una hipérbola degenerada de solo una rama, para la cual la diferencia de distancias es igual a 0. La figura de la derecha en esa ilustración muestra dos ramas infinitamente largas de una taxi-hipérbola de diferencia 4.

En la figura superior de la ilustración inferior de esa misma página se nos presenta otra de las sorpresas de la geometría de la cuadrícula. En esta hipérbola la diferencia constante vale 2. Ahora las dos ramas de la hipérbola son dos conjuntos de infinitos puntos, uno en el cuadrante superior izquierdo del plano y otro en el cuadrante inferior izquierdo, provistos cada uno de una "cola" de longitud infinita. Como se muestra en la parte baja de la ilustración, los resultados son parecidos cuando la diferencia vale 8, aunque aquí los conjuntos infinitos de puntos están en los sectores superior derecho e inferior izquierdo, y carecen de cola.

Situados los focos como se ve en todos estos ejemplos, la diferencia constante no puede ser número impar, porque la figura resultante contendría puntos no situados en las intersecciones, únicos admisibles en la geometría de la cuadrícula. Como ejercicio, sitúense A y B en vértices opuestos de un rectángulo euclídeo de 3 por 6 cuyos lados sean rectas de retículo, y trácese la hipérbola cuya diferencia constante sea 1. Resultarán entonces dos ramas "paralelas", cada una de ellas semejante a la hipérbola degenerada de diferencia constante 0. Un problema no muy sencillo consiste en enunciar condiciones exactas en las que se originan hipérbolas de cada uno de los cinco tipos generales.

Tan sólo se ha publicado un libro sobre la geometría taximétrica. Se trata de *Taxicab Geometry,* obra en rústica debida a Eugene F. Krause, matemático de la Universidad de Michigan. (Este libro, juntamente con unos cuantos artículos entresacados de la docena o así que han sido dedicados al tema, sobre todo en las revistas inglesas de las dos últimas décadas, se cita al final de la revista, en la bibliografía.) Recomendamos particularmente el libro de Krause a quienes deseen estudiar la elegante generalización de la taxigeometría a la totalidad del plano cartesiano, donde los puntos vienen dados por pares ordenados de números reales, que representan coordenadas respecto de un sistema de ejes. La regla de medición de distancias, siguiendo un camino de longitud mínima formado por tramos paralelos a los ejes de coordenadas, tiene que seguir en vigor, como es obvio. Por ello, en esta versión continua de la geometría de la cuadrícula habrá una infinidad de caminos, todos ellos de igual longitud mínima, que conecten dos puntos situados en la misma calle.

Krause demuestra que, en la versión "continua", la taxigeometría cumple todos los postulados de la geometría euclídea, salvo uno. En lugar de violar el notable postulado de las paralelas, como hacen las geometrías elípticas e hiperbólica, la geometría taximétrica viola el axioma "lado-ángulo-lado", que postula que dos triángulos son congruentes si y solamente si dos lados y el ángulo comprendido entre ellos de uno de los triángulos son congruentes a dos lados y el ángulo comprendido entre ellos en el otro.

A medio camino entre la versión discreta de la taxigeometría que acabo de exponer (confinada a lo que suele llamarse retículo de enteros) y la versión continua, tenemos otra taxigeometría, donde los puntos del espacio asociado están definidos mediante pares ordenados de números racionales. No obstante, incluso limitándonos al retículo de enteros, la geometría de la cuadrícula es fértil terreno de investigación para los aficionados a la matemática recreativa, y debería tener papel estimulante y enriquecedor para los estudiantes de primeros cursos de universidad. Apenas si aquí he rozado la superficie del tema, y he dejado sin plantear muchas cuestiones fundamentales. ¿Cómo deberíamos definir el paralelismo? ¿Cuál sería el mejor modo para definir la mediatriz de un segmento? ¿Existe algún método útil para definir la noción de área?

Por otra parte, la taxigeometría se generaliza sin dificultad a retículos de enteros de dimensión tres o superior. Queda mucho campo inexplorado en la investigación de este tipo de geometrías sobre otros retículos, por ejemplo, triangulares o hexagonales, tanto finitos como infinitos. En realidad, no es necesario que el retículo forme parte de un plano; podemos definirlo sobre superficies cilíndricas o tóricas, sobre esferas, bandas de Möbius, botellas de Klein... ¡prácticamente donde uno desee! Lo único necesario es estar seguro de que los taxis se limitan a rodar por las calles, y de que toman siempre el camino más corto hasta donde pretendamos ir.

En la sección sobre empaquetamientos densos de cuadrados (diciembre de 1979) presenté el empaquetamiento más denso conocido entonces de 11 cuadrados unitarios alojados en un cuadrado mayor. Hans Berlin propuso el problema de los 11 cuadrados a los lectores de *Ronden,* y recibió dos cartas con dos disposiciones descubiertas independientemente, en las que, ladeando cuatro cuadrados (en lugar de tres) un ángulo de 41,56 grados se consigue un empaquetamiento más denso, en un marco de sólo 3,886 +. Mats Gustafsson y Magnus Thulin descubrieron una solución aún mejor, inclinando cinco cuadrados 40,18 grados. Esta disposición puede verse arriba. El lado del cuadrado es 3,877 +.

Taller y laboratorio

Volvemos sobre los punteados caóticos. Esta vez con programas de ordenador para generarlos

Jearl Walker

El examen que de las figuras de punteado caótico realicé el pasado mes de junio ha suscitado muchos comentarios de lectores que han ideado variaciones sobre aquellos experimentos. Este mes voy a describirles algunos de estos nuevos experimentos, y, además, para los aficionados que posean o tengan acceso a un ordenador doméstico, voy a presentar un programa que genera figuras de punteado caótico.

En mi artículo de junio les describí algunas figuras de punteado caótico en las que podían percibirse círculos, espirales y otras formas no casuales. Vimos entonces que, para generar una figura de éstas, lo primero que había que hacer era rociar con pintura una hoja de papel. Después se sacaba una transparencia de la figura resultante, que se colocaba sobre el original. Si ambas figuras estaban a la misma escala y se acoplaban cuidadosamente, el observador no contemplaba nada extraño. Pero si una de ellas se hacía girar alrededor de un punto, aparecían círculos concéntricos (formados por parejas de puntos homólogos). En otros ensayos, la escala de la transparencia era distinta de la del original y, al hacerla girar en torno a éste, se generaban espirales. Podían crearse múltiples formas no aleatorias eligiendo distintos ángulos de giro y escalas.

Estos círculos y espirales los califiqué entonces de ilusiones, pero algunos lectores me han corregido señalando que no son fantasías sino realidad (como resultado de la yuxtaposición de ambas figuras). Por tanto, un término que expresará mejor lo que se ve es el de percepción.

Algunas de las investigaciones más completas acerca de estas percepciones las ha dirigido Leon Glass, de la Universidad McGill, quien prefiere llamar a estos efectos figuras moiré de punteado caótico. En una de las variaciones a su dispositivo básico deposita un dibujo de puntos caóticos sobre su propio negativo. El original consiste en puntos negros sobre fondo blanco o transparente y el negativo en puntos blancos sobre fondo grisáceo. Cuando Glass gira la hoja de arriba, aparecen dibujos en forma de pétalos (y no círculos). Diríase que sólo se generan círculos cuando el contraste entre el punteado y el fondo es similar; las distribuciones de contraste disímil dan pétalos.

En otro de sus experimentos Glass genera un punteado caótico salpicando de pintura negra un papel blanco, de lo que saca un negativo. Después, imprime por serigrafía el original en amarillo y el negativo en azul. Cuando estas impresiones se superponen y se hacen girar, aparecen círculos. Glass repite luego el experimento invirtiendo los colores y, esta vez, la superposición y el giro dan pétalos.

Algunos lectores me han escrito acerca de las aplicaciones de las figuras moiré. Una de las cartas más interesantes me la remitió Edward B. Seldin, de la Escuela de Odontología de Harvard y del Hospital General de Massachusetts. En su profesión de cirujano bucal y maxilofacial, Seldin ha de corregir ciertas deformaciones desplazando piezas del esqueleto facial. Para ello, saca calcos de la anatomía de los pacientes sirviéndose de radiografías, para así analizar los posibles cambios a introducir. En muchos casos lo que busca es el eje alrededor del cual pueda hacerse girar parte del esqueleto facial para llevar a cabo la alteración de éste.

Para determinar dicho eje, Seldin ha ideado una nueva técnica basada en las figuras moiré de punteado caótico. A ese fin, comienza colocando las piezas fijas del esqueleto sobre un fondo de puntos caóticos. Luego, sobre una hoja transparente con el mismo fondo, calca las piezas móviles del esqueleto. Cuando esta hoja se casa cuidadosamente con el otro dibujo, los puntos caóticos coinciden. Seguidamente, Seldin ajusta las piezas móviles deslizando la hoja transparente sobre el otro dibujo. El único eje de rotación para el reajuste concreto que entonces habrá conseguido es el indicado claramente por los círculos que aparecen en los punteados superpuestos. El reajuste puede hacerse girando la pieza móvil alrededor del punto que resultó ser el centro de los círculos.

Las ilustraciones de la página 121 exponen el procedimiento de Seldin. Se toma una radiografía. Se calcan los contornos de los tejidos duros y blandos del paciente y ciertas señales. (El paciente tenía la dentadura entreabierta y prognatismo.) Seldin calcó la parte superior de la anatomía facial sola y superpuso el calco sobre un punteado caótico. Este calco lo hizo en acetato; el punteado es de A. G. Klein y se publicó en el número de junio. Seldin calcó también la anatomía facial sola superpuesta sobre el mismo punteado.

La ilustración superior de la página 121 muestra las partes faciales superior e inferior tal como se presentaban en el paciente. Obsérvese que los punteados superpuestos no revelan ordenación particular alguna de los puntos. En la figura siguiente Seldin ha desplazado la transparencia de la anatomía inferior de suerte que los dientes se junten correctamente y el contorno de los labios haya mejorado. El eje de rotación de esta corrección se encuentra en el centro de los círculos que pueden percibirse en los punteados.

Esta nueva técnica facilita la planificación de los procedimientos quirúrgicos de viabilidad práctica. Así fue como Seldin pudo cortar la rama ascendente del maxilar inferior para dotarlo del radio de curvatura necesario para que los dientes se deslizaran unos sobre otros hasta conseguir la corrección. Otra práctica correctora alternativa hubiera sido cortar y eliminar una cantidad de hueso conveniente de la mandíbula inferior.

Según Seldin, puede determinarse la ubicación exacta y el tamaño y forma de la osteotomía (eliminación de hueso) trazando una recta que parta del eje de rotación y gire después el mismo ángulo que los punteados. Personalmente encuentro muy incitante esta aplicación de los punteados caóticos.

Philip Garrison, de Montreal, me ha escrito acerca de sus trabajos con una fotocopiadora Xerox para producir círculos y espirales sobre un punteado caótico. Fotocopió el secante de un tablero de dibujo; volvió a pasar la fotocopia por la máquina tras girar ligeramente el secante a partir de su primera posición. El papel, al salir, llevaba dos copias del secante, una girada respecto a la otra. Las copias del punteado originaron círculos.

Algunas fotocopiadoras permiten

obtener reducciones del original. Con estas máquinas pueden conseguirse espirales o "explosiones solares" sobre los punteados. Para ello se saca una copia de algo parecido al secante de Garrison. Luego se sustituye el secante por la copia y se saca una segunda copia. Esta segunda copia se coloca en el lugar de la primera, y se saca una tercera copia. Se saca una reducción de esta tercera copia. Para reunir ésta con la primera copia en una misma hoja se introduce la tercera copia en la máquina y vuelve a reproducirse la primera copia.

Guy Ottewell, de la Universidad de Furman, sugiere que colocando una fotografía a media tinta sobre su negativo puede crearse uno de los mejores efectos moiré. Si ambos se acoplan cuidadosamente, toda la superficie aparecerá negra porque cada zona transparente del negativo estará emparejada con una zona negra del positivo. Cualquier ligero desajuste producirá una superficie relativamente blanca y, si se desplaza el negativo sobre el positivo, dicha zona blanca se verá evolucionar como deslizándose por la superficie.

Joe Huck, de Irving, Texas, me ha remitido una ingeniosa versión de esta técnica. En principio había estado tratando de crear una figura de elementos espaciados al azar, cuya densidad no variase demasiado. Y así, estuvo trabajando con punteados tales que, al depositar uno sobre otro, las hileras de puntos coincidentes generaban figuras moiré.

Modificó el procedimiento para crear figuras de una sola imagen. Para ello sacó una foto de una serie de puntos y la taladró con un punzón circular de 6 milímetros, de modo que cada taladro contuviera un punto. Pegó los círculos desprendidos en un papel tangentes entre sí, obteniendo un conjunto de círculos dispuestos triangularmente.

Cuando los lados del triángulo alcanzaron una longitud de varios centímetros, Huck lo fotografió con película de gran contraste, de manera que en el

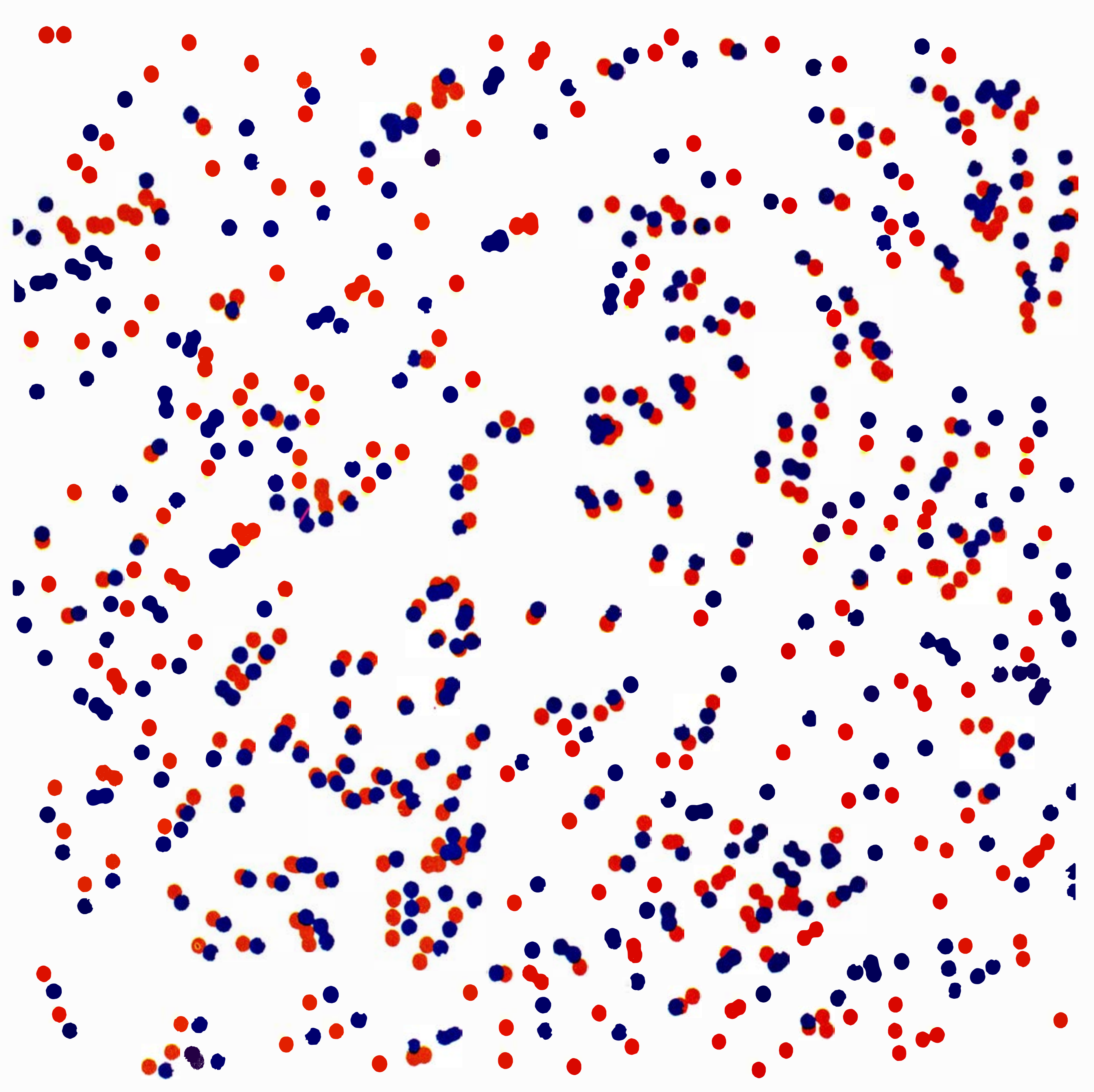


Figura conseguida por el procedimiento de superposición de colores de Leon Glass

negativo aparecieran únicamente los puntos. De este negativo sacó muchos positivos, que engomó reunidos formando una disposición triangular; fotografió el conjunto con una reducción del 50 por ciento. El resultado, de dimensiones 20 por 25 centímetros aproximadamente, presentó una figura de puntos espaciados unos 3 milímetros por término medio.

Huck hizo tres transparencias más valiéndose de un estenoscopio donde los puntos de esta figura hicieran las veces de estenopes. A tal fin, iluminó el estenoscopio a través de un recuadro compuesto por una placa de vidrio traslúcido y una lámina de plástico para difuminar la luz; colocó en el recuadro una película transparente de color rubí, en la que previamente había recortado una estrella de gran tamaño, de suerte que la foto resultante estuviera formada por estrellas.

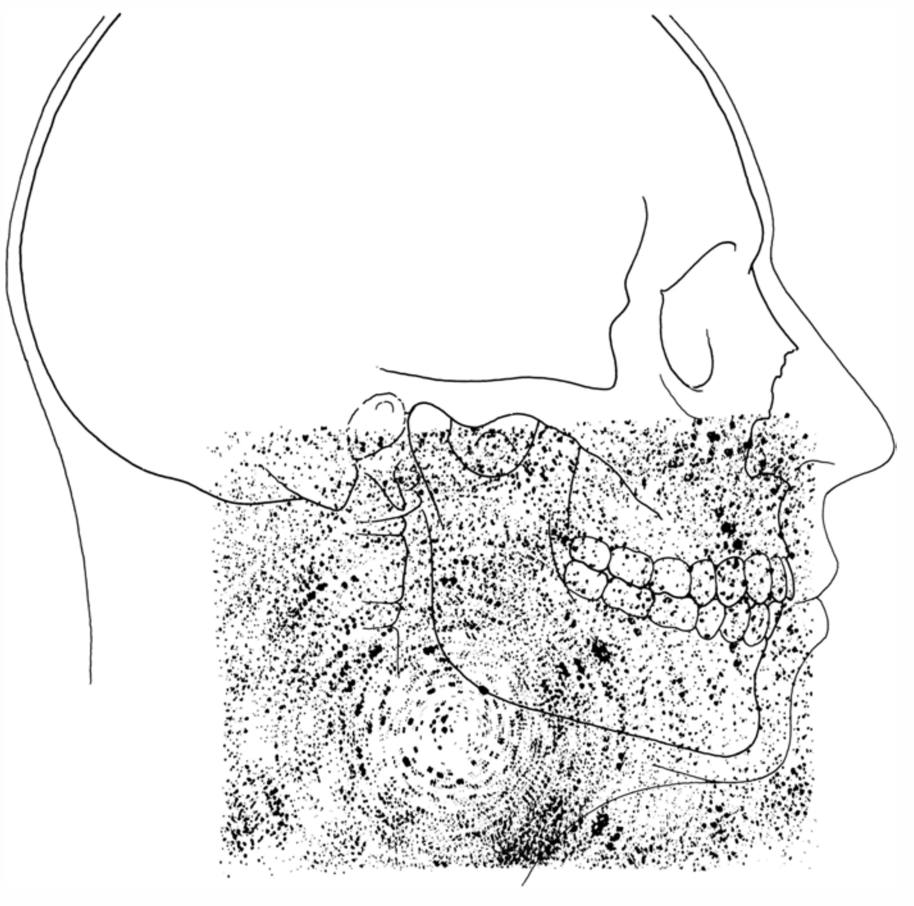
Próxima al otro extremo de la cámara, Huck dispuso una placa fotográfica de vidrio que portaba una copia del punteado; cada punto valía de estenope y cada uno de ellos proyectaba una imagen de la estrella sobre un trozo de película fotográfica que había colocado en el fondo de la cámara. El negativo de esta película es la segunda de las transparencias que me ha remitido; la primera es el punteado primitivo.

En la tercera transparencia, que es una impresión por contacto de la segunda, el blanco y el negro aparecen invertidos. Una cuarta transparencia es igual a la segunda, con la salvedad de que las estrellas se solapan. El tamaño de las estrellas de las transparencias segunda, tercera y cuarta lo determinó la posición de la placa de vidrio y, aunque el tamaño de las figuras varía algo, las dimensiones de los punteados son proporcionales entre sí ya que fueron generados todos ellos por el mismo punteado montado en la placa de vidrio.

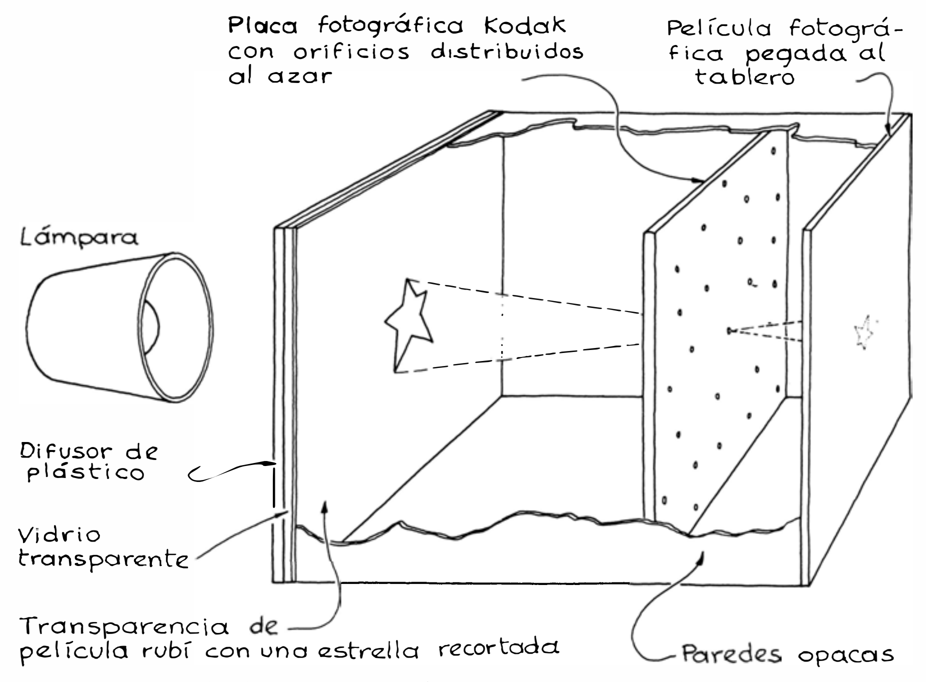
Cuando la primera transparencia de Huck se coloca encima de cualquiera de las otras (sobre una mesa de luz o contra una ventana grande) y se emparejan cuidadosamente, aparece la imagen de una estrella grande. Huck recomienda combinar las transparencias primera y cuarta y, a pesar de que en esta última el solapamiento hace que las estrellas se confundan, la combinación pone perfectamente de manifiesto una estrella oscura grande. La superposición de las transparencias primera y tercera genera una estrella blanca grande. El resultado de superponer las transparencias segunda y tercera es una imagen que se asemeja a una gran tela de araña.



Estructura facial incorrecta con el punteado caótico superpuesto por Edward B. Seldin



Corrección sugerida al mover dos punteados superpuestos



Sistema ideado por Joe Huck para formar punteados de estrellas

Henry M. Gerstenberg, de la Oficina Nacional de Pesas y Medidas, me ha remitido dos fotografías de botones. En una, la primera, aparece una colección fotografiada con película de gran contraste. Con el negativo de ésta produjo la segunda fotografía, en la que el giro de los botones crea un dibujo circular como el que resulta al hacer girar un punteado caótico tal como ya les he descrito.

R. N. O'Brien, de la Universidad de Victoria, me ha descrito cómo ha aplicado el método de las rotaciones al estudio de la distribución de las gibas superficiales de las huevas de salmón. En el proceso de fecundación el espermatozoide se dirige a una de las gibas, dispuestas hexagonalmente y de apariencia similar. No obstante, el espermatozoide favorece a una giba determinada de entre un conjunto de ellas cuyo diámetro es de unos seis hexágonos. El tema de las investigaciones de O'Brien es la diferencia entre esa giba particular y las demás.

Para estudiar la regularidad en las distribuciones de las gibas O'Brien realizó transparencias de gran tamaño de micrografías electrónicas de la superficie de las huevas. La ampliación fue de unos 2300 diámetros. Tras superponer dos transparencias idénticas y girar una de ellas observó, para una rotación de unos 15 grados, la existencia de una estructura de unos tres diámetros mayor que la estructura hexagonal unitaria. Esta dimensión (unos 15 micrometros) era aproximadamente igual a la longitud de una recta que pudiera extenderse a través de las gibas de la superficie de la hueva. O'Brien sugiere que igualmente podrían estudiarse las ordenaciones locales que existan en distribuciones aparentemente caóticas. Como ejemplos, propone examinar "cosas tan distintas como la distribución de los flamencos alimentándose, los antílopes paciendo, los clientes de un bazar y la gente amotinada".

Utilizando un ordenador doméstico pueden generarse algunas de las figuras moiré estudiadas por Glass. En la ilustración superior de la página opuesta se expone el programa que sigo para crear círculos o espirales similares a los que aparecen al solapar punteados caóticos iguales girando después uno de ellos. El programa está escrito en Basic de nivel II para un sistema de microordenador TRS-80, adaptable a cualquier variación del lenguaje Basic. (Para facilitar la lectura, en la ilustración aparecen espacios en blanco entre las órdenes que deben eliminarse para comprimir las líneas cuando el programa se introduzca en el ordenador.)

Empezaré por describirles brevemente cómo opera el programa y qué es lo que aparece en pantalla. La línea 10 limpia la pantalla, establece un valor para PI y la conversión (DR) de grados a radianes. (En el lenguaje Basic, las funciones trigonométricas se expresan en radianes.) Las dos líneas siguientes preguntan (1) cuántos puntos deben desplegarse en la pantalla, (2) cuál ha de ser el ángulo de rotación entre las dos figuras iguales que van a generarse y (3) si la segunda figura debe estar contraída respecto a la primera. Si no hay contracción aparecerán círculos; si hay contracción, espirales.

Las coordenadas *X* e *Y* que en la pantalla ha de tener cada punto (designado por *K*) se eligen a través del generador pseudoestadístico RND de la línea 40. (El ordenador considera que la esquina superior izquierda es el origen de un sistema coordenado *X*-*Y*, en el que el eje *X* se extiende hacia la derecha y el eje *Y* hacia abajo.) Seguidamente el programa calcula las distancias horizontal *XX* y vertical *YY* entre el punto elegido al azar y el centro de la pantalla. Las líneas 60 a 90 asignan un ángulo *T(K)* al punto. Luego se calcula la distancia de éste al centro de la

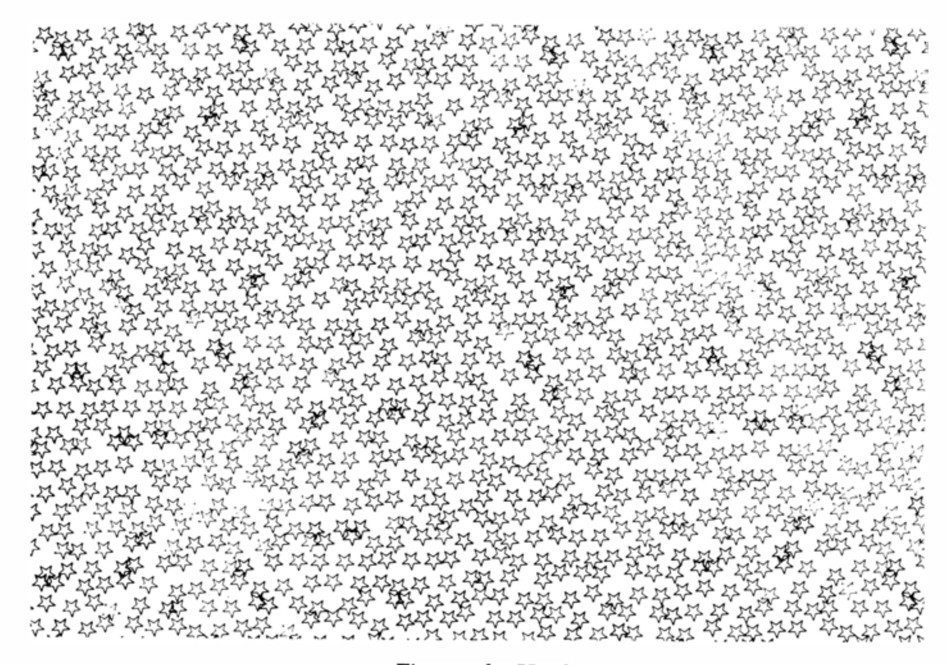


Figura de Huck

pantalla, que se llama *R(K)*. La última parte de la línea 100 tiene en cuenta un coeficiente de contracción para generar las espirales. El programa repite este proceso de situar un punto elegido al azar y asignarle un ángulo *T(K)* y una distancia *R(K)* hasta haber reunido el número de puntos deseado.

En la línea 120 se limpia de preguntas la pantalla, se pasa a radianes la rotación deseada y la máquina imprime un asterisco en el centro de la pantalla y (en la esquina superior izquierda) la rotación (en grados). La orden SET de la línea 130 manda la salida del moteado en pantalla. El programa localiza luego una pareja para cada punto, de suerte que cada pareja esté girada en torno al centro de la pantalla el ángulo antes elegido. En la línea 140 se calculan los valores de *X* e *Y* del segundo miembro de cada par; estos valores se redondean en la línea 141. Si la ubicación del segundo punto cae fuera de la pantalla, el programa recibe orden de pasar al punto siguiente del punteado inicial. Pero si el segundo punto está en la pantalla y en su lugar no hay ya un punto presentado, el programa hace aparecer el segundo punto del par correlacionado.

Este proceso se repite hasta que los puntos del punteado inicial aleatorio tienen todos su par (supuesto que esté en la pantalla) girado en torno al centro el ángulo designado. La línea 180 facilita tiempo para examinar la pantalla, una vez que hayan aparecido todas las parejas. Si se desea más tiempo antes de que se borre la pantalla, la cifra 400 que se ve en dicha línea habrá de cambiarse a un valor más elevado.

Después de una rotación, el programa borra la pantalla y hace salir el punteado inicial, más el girado, un ángulo doble del elegido originalmente. Volvemos a tener ocasión de observar la pantalla antes de que el programa muestre más rotaciones. La cifra 15 de la línea 120 regula el número de rotaciones; si se desean más, o menos, hay que cambiar dicha cifra. Cuando la máquina haya finalizado la última rotación, se ciclará en la línea 200 hasta que se pulse la tecla BREAK. Mientras llega ese instante, se mantendrá la última rotación en la pantalla. En realidad los puntos de la pantalla son pequeñas motas rectangulares de anchura igual a la mitad de la altura; por tanto, en los cálculos tuve que incluir factores de escala: la división por 2 en la primera parte de la línea 50 y la multiplicación por 2 en la línea 140.

Para someter el programa a prueba, lo hago trabajar con un solo punto, una rotación inicial de dos grados y contracción nula. Habitualmente el giro en torno al centro se aprecia sin dificultad. Una vez verificado el programa, hago pasar 100 o 200 puntos con la misma rotación inicial de 2 grados y sin contracción. Los círculos empiezan a aparecer por los bordes de la pantalla y después, cuando la rotación va aumentando en el transcurso del programa, se desplazan hacia el centro, dejando una confusión caótica de puntos en los extremos. Tras una rotación de 10 grados, más o menos, se pierde la percepción de círculos sobre el punteado. No estoy seguro del momento en que percibo los últimos círculos, pues parecen desvanecerse lentamente.

```
 1Ø CLS: PI=3.1416: DR=.Ø1745
 2Ø INPUT "NUMBER OF DOTS"; D: INPUT "SHIFT ANGLE (DEG)"; DD
 3Ø INPUT "SHRINKAGE (%)"; S: DIM X(D), Y(D), R(D), T(D)
 4Ø FOR K=1 TO D: X(K)=RND (127) : Y(K)=RND (47)
 5Ø XX=(X(K)-64)/2: YY=Y(K) - 24
 6Ø IF XX=Ø GO TO 11Ø ELSE T(K)=ABS( ATN(YY/XX) )
 7Ø IF XX<Ø AND YY=>Ø THEN T(K)=PI - T(K)
 8Ø IF XX<Ø AND YY<Ø THEN T(K)=PI + T(K)
 9Ø IF XX>Ø AND YY<=Ø THEN T(K)=2*PI - T(K)
1ØØ R(K)=SQR ( XX↑2+YY↑2): R(K)=R(K)*(1 - S/1ØØ)
11Ø NEXT K
12Ø FOR J=1 TO 15: CLS: DT=DD*J*DR: PRINT @ 544, "*";:
    PRINT @ Ø, DT/DR;
13Ø FOR K=1 TO D: SET (X(K), Y(K)) : NT=T(K)+DT
14Ø NX=64+2*R(K)*COS(NT) : NY=24+R(K)*SIN(NT)
141 NX=INT( NX+.5) : NY=INT( NY+.5)
15Ø IF NX<Ø OR NX>127 OR NY<Ø OR NY>47 GO TO 17Ø
16Ø IF POINT (NX, NY) THEN GO TO 17Ø ELSE SET (NX, NY)
17Ø NEXT K
18Ø FOR L=1 TO 4ØØ: NEXT L
19Ø NEXT J
2ØØ GO TO 2ØØ
```

Programa para hacer girar un punteado caótico en un ordenador doméstico

```
 1Ø CLS: INPUT "NUMBER OF DOTS"; D: DIM X(D), Y(D)
 2Ø INPUT "SHIFT SIZE=? ANSW IN X, Y"; SX, SY:CLS
 3Ø IF SX=Ø THEN N=Ø ELSE N=1
 4Ø IF SY=Ø THEN M=Ø ELSE M=1
 5Ø FOR K=1 TO D: X(K)=RND(127): Y(K)=RND(47) : NEXT K
 6Ø FOR J=1 TO 15: CLS:PRINT @ Ø,J;
 7Ø FOR K=1 TO D: X=X(K) - (SX+J)*N: Y=Y(K) - (SY+J)*M:
    SET (X(K), Y(K) )
 8Ø IF X<Ø OR Y<Ø GO TO 1ØØ
 9Ø IF POINT (X,Y) THEN GO TO 1ØØ ELSE SET (X,Y)
1ØØ NEXT K
11Ø FOR L=1 TO 4ØØ : NEXT L
12Ø NEXT J
4ØØ GO TO 4ØØ
```

Programa para trasladar horizontal y verticalmente un punteado caótico

Redacté el programa de suerte que cada punto y su par se imprimieran consecutivamente. En las primeras fases de la construcción de una figura recién girada, cada par de puntos correspondientes aparecerá probablemente en una zona de la pantalla un tanto aislada y, entonces, la rotación entre ambos se apreciará con facilidad. Pero en seguida se crearán más y más puntos alrededor de ellos, y quizá también entre ellos, tornándose la percepción progresivamente difícil.

Para dotar de contracción a las figuras hay que introducir un valor porcentual (*S*) cuando el programa lo pregunte en las etapas iniciales. Un valor cero no produce contracción; un valor 5 produce una contracción del 5 por ciento entre la figura de punteado caótico inicial y la girada. Para ángulos de rotación y contracciones bajos, aparecen en pantalla configuraciones espirales. Desaparecen las espirales si la contracción o la rotación se agrandan.

Para una contracción del 10 por ciento aproximadamente y una rotación nula se materializa una figura muy curiosa. (Se introduce 0 cuando el programa pide el ángulo de rotación.) Ocurre que la pantalla parece situarnos en el extremo de un "cilindro" de estrellas infinito; recuerda a los decorados que se emplean en el cine para dar al público la sensación de viajar a "velocidades galácticas" a través de las estrellas.

El programa que aparece en la ilustración inferior de esta página produce una traslación lineal del punteado caótico presentando en la pantalla del TRS-80. El programa pregunta cuántos puntos se desean. Después ha de deci-

dirse si optamos por un movimiento horizontal o vertical, o si ha de incluir ambas direcciones. La línea 70 determina la aparición de los puntos elegidos al azar y calcula el corrimiento de la pareja de cada uno de aquéllos. La línea 70 produce entonces la aparición en pantalla de las parejas.

Cuando se han hallado y presentado todas las parejas, el programa se detiene en la línea 110 para que pueda examinarse la pantalla. Se borra ésta y aparece el punteado original con sus nuevas parejas, ahora más corridas. Este proceso sigue durante 15 corrimientos de la longitud que se introdujo al contestar a la pregunta de la línea 20. Si se desean más, o menos, corrimientos hay que cambiar correspondientemente la cifra 15 de la línea 60.

Durante las primeras etapas, la distribución de puntos que contemplamos en la pantalla desarrolla una figura en la que se revela perceptiblemente la dirección de corrimiento. Cuantos menos puntos haya, tanto más manifiesta será la dirección del corrimiento. Seleccionando bien el corrimiento inicial puede inducirse que el punteado se desplace en línea recta hacia la izquierda, en línea recta ascendente o inclinado hacia la parte superior izquierda. Tras varios ciclos de corrimiento, la configuración del punteado empieza a desaparecer; ello es así porque, entonces, ya habrá muchos pares de puntos correspondientes que tendrán otros puntos entre ellos o en su vecindad, por lo que nuestro sistema visual no podrá discernir las parejas reales. Desde ese momento, los corrimientos no alteran ya perceptiblemente el punteado. Cada desplazamiento produce el paso de un punteado caótico a otro.

Al igual que en el otro programa, se aprecia mejor un patrón en el punteado cuando la densidad de puntos es relativamente baja. Con todo, yo suelo pasar este programa con 100 o 200 puntos en la figura original. En cada ciclo se limpia la pantalla; se presentan luego los pares de puntos (un original con su pareja desplazada). En esta primera etapa del ciclo es fácil discernir la dirección de corrimiento. Posteriormente cuesta mucho más percibirla, si es que no resulta imposible, debido a una densidad de puntos mayor.

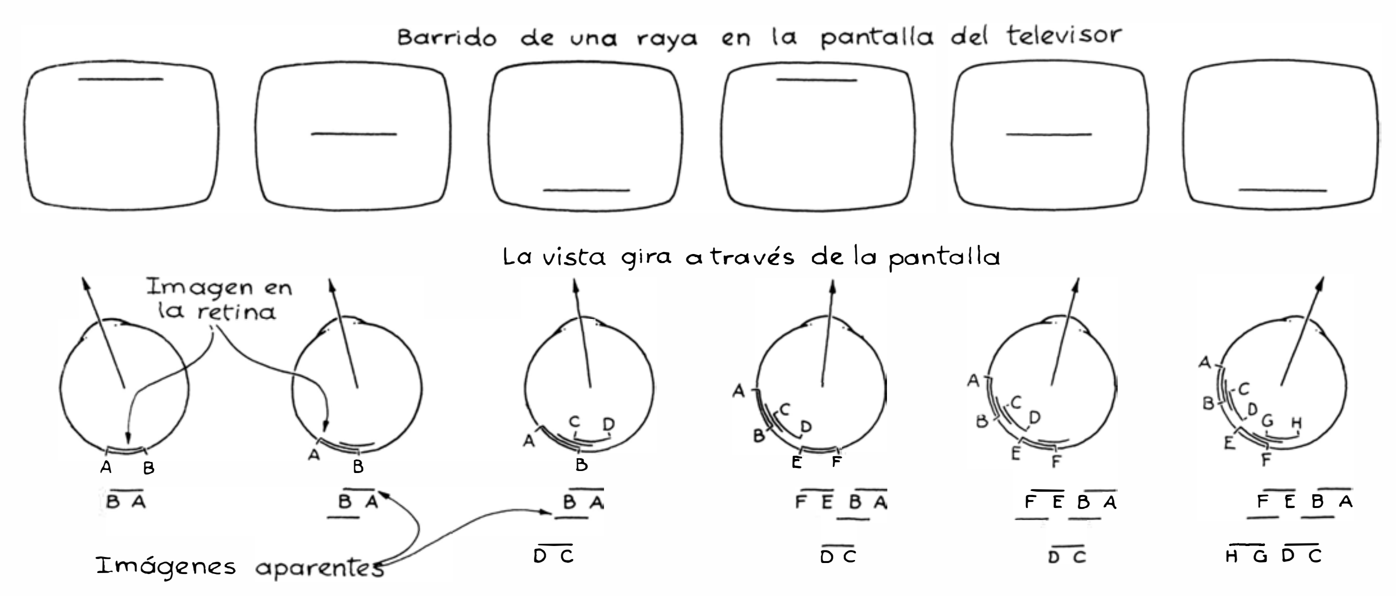
En la investigación de figuras de punteado caótico a través de un ordenador doméstico pueden introducirse algunas variaciones. Por ejemplo, la pantalla de control de mi TRS-80 tiene una presentación en blanco y negro, pero disponiendo de una presentación en colores podrían modificarse mis programas para que el punteado y el fondo de la pantalla apareciesen en color. Así podrían efectuarse algunos de los experimentos de Glass con punteados de colores.

¿Puede arreglarse la disposición de los colores de forma que aparezcan círculos haciendo girar un punteado original y no se produzcan al intercambiar los colores? Hay varios tipos de ordenadores que dan en la pantalla una separación más nítida que el mío; ello puede facilitar mucho la percepción de desplazamientos y rotaciones.

A quienes deseen ensayar algunos de los punteados de Glass les sugiero que, en vez de girarlo, lo ensanchen en una dirección (la horizontal, por ejemplo) y lo compriman en la otra (vertical). Es indudable que los lectores expertos en el manejo de ordenadores podrán modificar mis programas para que pasen más de prisa y ejecuten trucos nuevos. Recibiré con gusto todas las cartas acerca de cualesquiera modificaciones.

Hay un efecto óptico muy curioso que puede observarse cuando echamos una mirada rápida a través de la pantalla de un televisor que funciona en una habitación a oscuras. Así, si nos colocamos de pie a algo menos de dos metros de la pantalla y empezamos fijando la vista en un punto situado a unos treinta centímetros a la izquierda de la pantalla y luego la desplazamos con rapidez hasta un punto situado a la misma distancia a la derecha de la pantalla, probablemente veremos una imagen de lo que hay en el televisor como "flotando" en el aire, y a la derecha de la pantalla. Esta imagen extra aparecerá sesgada, con su parte superior desplazada hacia la derecha respecto a la base; puede contener además los mismos detalles que la imagen del televisor. Al desplazar la vista a través de un ángulo mayor (y ajustando quizá nuestra distancia a la pantalla), veremos probablemente varias imágenes fantasma de éstas en la parte derecha, aunque cabe que las que estén al extremo del conjunto no se manifiesten completas. Moviendo la vista en sentido contrario, las imágenes fantasma aparecerán a la izquierda de la pantalla; son similares a las que surgen a la derecha, salvo en que se inclinan en sentido contrario.

Tengo entendido que fue T. G. Crookes, en 1957, el primero en dar cuenta de este efecto. Lo explicó en función de la manera en que se crea la imagen en la pantalla y de la posición en la que se forma la imagen en la retina mientras los ojos recorren el aparato. En un televisor, la imagen la



Formación de extrañas imágenes en la retina provocadas por líneas que aparecen en el televisor

crea un haz de electrones que barre la pantalla, excitando luminóforos que emiten luz al caer a niveles energéticos inferiores. El haz barre la pantalla horizontalmente, raya a raya, hasta alcanzar la base, barrido cuya rapidez impide sea visto por el espectador.

Supongamos ahora que, mientras desplazamos la vista por la pantalla de izquierda a derecha, el haz ha comenzado a llenar otra imagen, a partir de la parte superior de la pantalla. En la ilustración de la página opuesta se designa *AB* la raya que se genera en ese preciso instante. La creación de la imagen prosigue a la vez que desplazamos nuestra visual y rápidamente se genera la última raya de la imagen, pero a ésta no le corresponde el mismo lugar de la retina porque nuestra vista se ha movido. En su lugar se forma en *CD,* posición que en la retina está realmente a la derecha de *AB,* si bien nuestro cerebro la interpreta como si se hallara a la izquierda. (El cerebro invierte izquierda y derecha así como arriba y abajo al interpretar lo que estamos viendo.) La imagen, que se encuentra a la derecha de la pantalla porque hemos hecho girar la vista, es un paralelogramo cuyo lado superior está corrido hacia la derecha con respecto a la base.

Desplazando la vista con rapidez suficiente y situándonos a una distancia conveniente de la pantalla, podremos observar otras imágenes fantasma. La primera de ellas, más separada hacia la derecha y, la segunda, entre ésta y la pantalla. Esta segunda imagen la crea la proyección siguiente de una imagen sobre la pantalla. La primera raya de esta última cae en la retina a la derecha, y, la segunda, entre ésta y la pantalla. Esta segunda imagen la última raya cae en *GH.* Nuestro cerebro interpreta esta imagen como si fuera un paralelogramo, sesgado en el mismo sentido que la primera imagen.

Repitiendo estas observaciones desde una distancia mayor, aunque con la misma velocidad de giro de la vista, descubriremos dos cambios. Primero: las imágenes fantasma son más pequeñas porque la pantalla ocupa un ángulo menor dentro de nuestro campo visual; segundo: estas imágenes están más torcidas. El segundo efecto síguese del primero. Por ser las imágenes más pequeñas, las rayas superior e inferior de cada una también lo serán y, dado que desplazamos nuestra vista a la misma velocidad que antes, el que la imagen de la parte inferior sea menor significa que estará más desplazada respecto de la imagen de la raya superior de lo que está en las observaciones hechas más cerca de la pantalla. La imagen se ve entonces más torcida.

A distancias suficientemente cortas, las imágenes fantasma se solaparán en virtud de la separación inadecuada de las imágenes en la retina. Cuando nos alejamos del aparato, las imágenes se distancian más, pero resultan demasiado pequeñas para que dejen ver los detalles de la imagen formada en la pantalla. Al observar varias imágenes fantasma, la más cercana a la pantalla aparecerá menos clara que las demás porque tiene su origen en una imagen que cae claramente fuera del centro visual de la retina.

Para mantener la velocidad a la que barremos la pantalla con los ojos puede seguirse la sugerencia de Crookes de montar sendos objetos luminosos y pequeños en el mismo plano de la pantalla, a cada lado de ésta. Movemos la vista de uno a otro; si nos alejamos del televisor, aunque pretendiendo mantener la velocidad de barrido visual, trasladaremos los objetos hacia los lados, de manera que el ángulo que formen dentro de nuestro campo visual continúe siendo el mismo.

Cuando miramos rápidamente hacia arriba o hacia abajo, la pantalla produce unas imágenes fantasma menos espectaculares. Si el movimiento es descendente, debajo de la pantalla aparecerá una imagen brillante y aplastada. El movimiento ascendente produce una imagen más tenue (encima de la pantalla), alargada verticalmente. Estas imágenes se engendran por el mismo mecanismo que las otras más espectaculares. La diferencia de sus alturas se debe a la forma en que se crea la imagen en el aparato. El barrido de las rayas comienza por arriba y se va trasladando hacia abajo. Si movemos la vista hacia abajo, las imágenes de las rayas superior e inferior de la pantalla estarán en la retina relativamente próximas, dándonos así una imagen aplastada. Si movemos la vista hacia arriba, las imágenes de ambas rayas se separarán relativamente, produciendo una imagen alargada verticalmente.

La mayoría de las demás imágenes luminosas no producen este efecto, porque carecen de aparición y desaparición rápida. Por ejemplo, al barrer con la vista una pantalla de cine, sólo veremos lateralmente un veteado borroso. Ocurre que en el cine cada imagen viene ofrecida por un fotograma que se proyecta íntegro y de una vez, en tanto que estos efectos sólo aparecen cuando, como en la televisión, los elementos iluminantes que forman la imagen se encienden y se apagan con gran rapidez.

Libros

Orígenes del hombre, historia reciente de la ciencia y mecánica de fluidos

Arturo Valls, Luis Alonso y Antonio Crespo

Los Origenes del Hombre, por Richard E. Leakey y Roger Lewin. Editorial Aguilar; 265 págs. Madrid, 1980. Por el hecho mismo de su naturaleza humana ningún hombre debería ignorar las bases biológicas y culturales, aún las más rudimentarias, de su origen y evolución. Pero enseñar esas bases al convencionalmente llamado "gran público" no resulta tarea fácil. Como dijo Baudelaire, "rien n'est plus fatigant que d'expliquer ce que tout le monde devrait savoir". Sin embargo, lo han conseguido –y, por cierto, de forma muy afortunada– Leakey y Lewin, el primero de ellos perteneciente a una brillante dinastía de paleoantropólogos que se remonta a John Frere. *Los orígenes del hombre* está dividido en diez partes bien escalonadas que nos remontan, en una síntesis rigurosa pero de lectura asequible a los no especialistas, desde el origen de los Vertebrados hasta el enfrentamiento del hombre actual con su devenir biológico como especie animal.

En la primera ("La Humanidad en perspectiva") se diseca con cuidado el interés de la paleoantropología como ciencia inter- y multidisciplinaria y se resume la historia paleontológica de la tierra. Se introducen, sin embargo, algunas afirmaciones no exentas de alguna crítica como la de que "El hombre... es una criatura... de elevada estatura y gran inteligencia que, por medio de la tecnología y de su resolución, ha llegado a dominar al mundo", lo que nos parece fuertemente teñido de antropocentrismo. Encontramos asimismo un exceso de alarmismo cuando se mantiene (pág. 13) que dos tercios de los hombres actuales sufren hambre.

El origen del hombre, suponiendo que se pueda hablar así, se remonta a una época mucho más lejana que las 9 de la mañana del 23 de octubre de −4004, como se admitía antes de Lamarck y de Darwin. En la segunda parte ("La mayor revolución") los autores desmontan la eterna pregunta que se hace siempre a los antropólogos: "¿Desciende el hombre del mono?", sintetizando la historia de las ideas evolucionistas, describiendo los primeros hallazgos de homínidos y de hombres fósiles y llevando al lector al convencimiento de que, como escribiera Darwin en una carta a Wallace, "el origen del hombre es el problema más elevado y más interesante para un naturalista". También en esta parte reprocharíamos a los autores afirmaciones antropocéntricas, teñidas esta vez de aristogénesis, como la de que "la evolución... es una progresión continua de complejidad biológica cuyo producto más refinado es el *Homo sapiens*".

"Las raíces de la Humanidad" y "Comienzos de los Homínidos" constituyen las partes 3.ª y 4.ª, respectivamente. Se exponen aquí las presiones evolutivas que permitieron la radiación adaptativa de los Primates, como la transformación de las extremidades, la frontalización orbitaria, la limitación de corpulencia, la distribución geográfica, etc., y que actuaron desde el Paleoceno hasta hoy. Se rastrean los más significantes restos fósiles de nuestra historia evolutiva: *Aegyptopithecus, Dryopithecus* (el cráneo de Rusinga fue, precisamente, hallado por Luis y María Leakey, padres de Richard) y *Ramapithecus*. Los autores soslayan las cuestiones de nomenclatura y de datación porque, en realidad, tampoco el tipo de lectores a que se destina el libro está interesado en tales debates. No se olvida, en cambio, desplegar hábilmente los trabajos de Goodall en chimpacés y de Strum en babuinos, que tanta luz nos han dado sobre la etología de los Primates no humanos y que permite, con las debidas precauciones, ciertas extrapolaciones al probable (quizá fuera más riguroso decir posible) comportamiento de *Ramapithecus*.

El capítulo quinto, "La cuna de la Humanidad" (que para los autores, ni que decir tiene que es Africa), es, realmente, una historia de los descubrimientos de los *Hominidae* fósiles sazonada, y a nuestro juicio ello forma uno de los atractivos del capítulo, con la interpretación de las primeras culturas líticas y de la valoración de la etnoarqueología en la apreciación del desarrollo cultural de nuestros lejanos antepasados. El problema es difícil. Leakey y Lewin lo comparan acertadamente a la tarea de encajar un rompecabezas tridimensional en el que faltara la mayoría de las piezas y aquellas de las que se dispone estuvieran rotas... El capítulo concluye con unas páginas sobre la aparición de las primeras bandas del *Homo erectus*. Personalmente hubiéramos preferido una mejor ordenación en la historia de los citados descubrimientos y en las etapas del desarrollo de las culturas materiales. Además, aceptar sin discusión la especie *Australopithecus boisei* nos parece ligeramente dogmático, a pesar de la indiscutible autoridad de los autores en el problema.

Se afirma de nuevo en la sexta parte ("De Africa a la agricultura") que *Homo* nació en Africa; quizás el lector no especializado apreciaría mayor precaución ante tal aserto porque cuando se presenta la propagación del *Homo erectus* en la figura de la página 121, las formas javanesas y chinas parecen independientes de la flecha que indica la migración Africa-Europa de tal antecesor. Ese mismo lector puede sorprenderse al leer en la pág. 122 que "La elevación del cráneo... y el avance (*sic*) de la mandíbula son básicamente los rasgos concretos a que se reduce esta última e importante fase de la evolución humana". (Se refiere al paso de *H. erectus* a *H. sapiens*.) Por otro lado, la idea de que el hombre de Neanderthal sucumbió por "especializarse demasiado" y por "no adaptarse a los tiempos más cálidos que se avecinaban" nos parece muy discutible. Lamentablemente abundan las frases confusas para el lector no iniciado y, por otra parte, la figura de la página 136, de la clásica calota y fémur del "Pithecanthropus", diríase que está como mal recortada de la fotografía original, conocida por todos los antropólogos, de manera que el lector no especialista puede hacerse una inexacta idea de tales restos. Estos detalles empañan el capítulo, donde asimismo se describen y discuten los primeros balbuceos en el empleo del fuego, de los enterramientos, los cambios en la pigmentación y en la pilosidad, el comienzo del arte y el invento

de la agricultura. Una última objeción: encontramos desafortunado el término "Arqueología humana" (pág. 137), que nos suena a pleonasmo. Concluye el capítulo con la llegada de los primeros hombres a América y a Australia.

Para presentar su análisis de "La primera economía mixta" (capítulo séptimo), se comienza por comparar la caza colectiva, humana, con la individual de algunos Primates no humanos, extrayendo las consecuencias que implican para el comportamiento cooperativo y los sitemas sociales. Un factor importante, a propósito del cual los autores polemizan agudamente, es el del tamaño de las bandas cazadoras-recolectoras, tanto de nuestros antepasados como actuales, basándose en la etnología comparada. Dicho tamaño puede presionar como imperativo del tipo de parentesco, con las consecuencias antropogenéticas fáciles de imaginar. Para servir de ejemplo se escoge, muy acertadamente en nuestra opinión, el caso de los Bosquimanos Kung, investigados por R. Lee. Casi sin solución de continuidad se pasa al capítulo octavo ("Inteligencia, lenguaje y mente humana"). Se describen aquí los experimentos para estudiar el aprendizaje en los chimpancés, se alude con claridad a los mecanismos cerebrales de ese aprendizaje, se discute el problema de la cerebralización y se especula de forma interesante, y no exenta de humor, sobre el origen, la evolución y el por qué del lenguaje.

Ni la guerra ni la violencia están en nuestros genes, aunque los criptobelicistas, por muy premios Nobel que sean, salgan malparados con ello. Esta es la tesis de la novena parte ("Agresividad, sexo y naturaleza humana"). Leakey y Lewin desmoronan argumentalmente tan peligrosas como falsas ideas. Es quizá la parte más brillante y polémica de su libro. Es la cultura actual, el supuesto "progreso" técnico mal empleado lo que puede iniciar y conducir a la agresividad. La territorialidad es un ejercicio de exhibición competitiva más que de violencia física, y las disputas por la propiedad territorial se suelen canalizar en enfrentamientos estereotipados, no violentos. Por supuesto, que no seamos violentos no quiere decir que los Primates seamos ángeles... De una y de otra cosa nos dan ejemplo actual los pueblos "salvajes". Lo que sí es cierto, añaden Leakey y Lewin, es que el vandalismo de ciertos grupos, inteligentemente cultivado, puede beneficiar a ciertos sectores de la sociedad. El caso de los partidos de fútbol y de otras manifestaciones deportivas, que son hipócritamente tildadas de "válvulas de escape de la agresividad", son ejemplos manifiestos de estimulación organizada de mayor agresividad. El tan manoseado canibalismo, que tan oportunamente servía al supuesto heroísmo de colonos y misioneros, aparte de ser rarísimo, tenía un significado no violento casi siempre (tanto el endo como el exocanibalismo). Se describe asimismo en el capítulo el significado de ciertos aspectos de nuestro comportamiento reproductor, como el incesto, la endogamia y la, para muchos grupos necesaria, exogamia. Como le contestó un Arapesh de Nueva Guinea a Margaret Mead: "Si uno se casara con su hermana no tendría ningún cuñado. ¿Con quién trabajaría entonces? ¿Con quién cazaría? ¿Quién le ayudaría?". Ciertas normas de cultura referentes a nuestro comportamiento reproductor han de cumplirse como mecanismos empíricos de supervivencia de la comunidad. Los autores concluyen esta parte del libro con algunos comentarios sobre la posición social que ocupa la mujer en las sociedades primitivas actuales y pasadas.

En el décimo y último capítulo ("El futuro de la Humanidad"), cumplen el ambicioso enunciado empezando por abordar los conflictos humanos en general y el racismo en particular. Ambos son justamente tratados como gravísimos peligros para el devenir de nuestra especie. Pero no son los únicos. Los hombres, a diferencia de los otros Primates, hemos ampliado todas las facetas (sería más riguroso decir casi todas) de nuestro comportamiento a los sistemas de subsistencia practicados. Nuestro nivel de vida europeo-occidental no sólo no es el mejor objetivamente sino que es peligrosamente elevado para que se practique a escala mundial. Esta tesis de Leakey y de Lewin nos parece más digna de discusión que de aceptación inmediata, aunque haya que reconocer, por ejemplo, los aspectos claramente perjudiciales de muchos "progresos" de la medicina, no sólo en nuestras sociedades, sino también en las "primitivas". Otro peligro, puede ser el más grave, lo representa la presión de la expansión demográfica. Muchas naciones púdicamente calificadas de subdesarrolladas interpretan, errónea pero comprensiblemente, las propuestas de las naciones ricas para disminuir su natalidad como una prueba más del imperialismo demográfico... Todo ello es fuertemente pesimista, pero la conclusión del capítulo –y del libro– deja abierta una posibilidad a nuestro futuro: "Haber llegado a esta tierra como producto de un accidente biológico sólo para desaparecer merced a la arrogancia humana sería una ironía definitiva" es la última frase de esta obra que recomendamos vivamente a *todos* porque *todos* somos protagonistas, deliberada o frívolamente, de nuestra aventura biológica y cultural y todos debemos aprender en sus páginas el respeto y la admiración a nuestro pasado, el orgullo y las limitaciones de nuestro presente para emprender sin egoísmo, pero sin pusilanimidad, nuestro futuro. Que no llegue a ser cierta la vieja frase de que el hombre es un animal del que ningún mono que se respete a sí mismo quisiera descender.

El libro de Leakey y Lewin es inestimable, la presentación de la versión española es irreprochable, idéntica a la original inglesa la parte gráfica (salvo las reconstrucciones aventuradas del excelente dibujante Ronald Bowen) no tiene defecto. Por desgracia, nos hubiera gustado que la perfección se ampliara también a la traducción castellana, y no ocurre así. Algunos términos son poco precisos (p.e., "conductalistas de animales" (pág. 12) en lugar de etólogos; "comedores de fruta" (pág. 45) en vez de frugívoros; "comedores de semillas" (pág. 69) y no graminívoros; el hombre de Neanderthal tenía un "continente" encorvado, etc.; se dice "geneticistas" y se habla de la raza (*sic*) Homo (págs. 224 y 13, respectivamente); se habla de los babuinos "hamadríados" (pág. 225), aparte de la habitual confusión entre "mono" y "simio", con la que se debería terminar de una vez para siempre por parte de nuestra Academia; algunos términos geográficos o etnológicos quedan sin traducir a nuestra lengua (como "Cushitic" en la pág. 80 y "Khalkidhiki" en la 131; se escribe osteodontokerática, con *k* (pág. 96), oldowaica (pág. 98), acheuliense (páginas 100-103 y 136), pero acheulense en el índice alfabético; en la figura de la página 191 se escribe por dos veces "área visiva" y en la de la página 193 quedan sin traducir "arcuate fasciculum" y "angular gyrum". Tales confusiones pueden aumentar la ya pesada carga de errores terminológicos del habla científica y diseminar el mal uso de palabras sin las que la ciencia se hace incomprensible para el profano. A pesar de los errores indicados, y otros menores, el balance final es muy

favorable para el libro comentado. (A. Valls.)

LANDAU. A GREAT PHYSICIST AND TEACHER, por Anna Livanova, traducida al inglés por J. B. Sykes; Pergamon Press, Oxford 1980. NOSOTROS Y LA CIENCIA, por Jorge Wagensberg, Antoni Bosch Editor, Barcelona 1980. La historia de la ciencia contemporánea se está relatando al par que se va construyendo la propia ciencia. Extensos estudios sobre la mecánica cuántica y su desarrollo hasta comienzos de la segunda guerra mundial, como el reciente de Kuhn, sobre el ADN, como el de Portugal y Cohen, hasta sobre los microcomputadores. La más de las veces, la historia objetiva y distante se entrevera con los recuerdos personales, con la autobiografía. Nunca la historia alcanzó cotas de mayor verosimilitud y transparencia, pues a la apreciación del cronista de turno se le opone la puntualización de quien ha vivido ese mismo acontecer de otra manera. Valga de ejemplo de lo último la recensión que apareció en *Nature* (6 de noviembre de 1980) de la primera de las dos obras que encabeza esta reseña. H. B. Casimir, físico emérito en el campo de bajas temperaturas, quien conoció a Landau en Copenhague a principio de los años 30, pone en duda que un hombre que supo de la cárcel soviética, y mostraba un carácter inestable, tendente a racionalizarlo todo, fuera realmente feliz; al menos, él no lo vio así. Ello sirve para cuestionar el carácter hagiográfico y ditirámbico de esta monografía sobre uno de los físicos más influyentes de nuestro siglo.

Todos los que le trataron están de acuerdo en sus sobresalientes dotes como maestro y como teórico. Fue el contrapunto de Kapitza, aunque compartía con él su confianza en las matemáticas, dominio en el que se le comparaba con Pauli. Fue además un generalista, el último se comenta, que si bien destacó en la física de bajas temperaturas, otros campos se siguen favoreciendo de sus logros teóricos: física nuclear, rayos cósmicos, plasma, etcétera. Reconocen en él, además, un divulgador capaz de llegar hasta el alumno incipiente. Livanova cuenta pormenores de su humanidad que nos lo hacen más cercano. Quizá lo más trágico, su merma drástica de facultades. El siete de enero de 1962 sufrió un accidente de automóvil. Durante seis semanas permaneció inconsciente y se le dio por clínicamente muerto. Médicos de todas partes vinieron en su auxilio que le ayudaron a recuperarse, menos en su vigor mental. Aun vivió seis años más.

Wagensberg es un joven profesor universitario que se diría educado en la Institución Libre de Enseñanza. Su pasión por la ciencia en todas sus formas recuerda la del neófito convencido de la nueva doctrina. Va más allá de los proceso físicos irreversibles, que es lo suyo, y pregona, como un nuevo catecismo de la escuela moderna, la ética, el progreso, la evolución y, para acomodarlo a los tiempos, el ambiente. El propio lenguaje que emplea en éste mano a mano con varios científicos lleva esa carga nerviosa: "El hombre necesita ideales porque sus actividades reclaman brújula, alimento y justificaciones".

Me parece legítimo el tono para entusiasmar el apagado interés por la ciencia entre nosotros. Como estimo acertado que sea un investigador quien entreviste a catorce representantes de otros tantos compartimientos del saber empírico: Oró, Margalef, Prigogine, Kowarski, Fisher, Tabor, Cardona, Mott, Hewish, Lighthill, Alder, Roegen, Rodríguez-Delgado y Grande Covián.

La estructura del diálogo entre el experto y Wagensberg es sencilla: el entrevistado responde, de un modo sistemático, a las preguntas, asimismo vertebradas, sobre la situación de su campo específico en la actualidad, futuro inmediato previsible e importancia social de ese quehacer determinado. No se rehúyen las preguntas comprometidas: a Margalef, ecólogo, sobre las centrales nucleares; a Prigogine, sobre la relación de sus teorías con la filosofía; a Fisher, sobre el control del mundo de la ciencia por la sociedad; a Cardona sobre la venalidad del científico. Ni, por supuesto, aquellas preguntas que todos esperamos que sean ellos, precisamente, los que las respondan: Hewish cuenta su descubrimiento de la estrella de neutrones; Grande, su visión del metabolismo basal; Oró, por qué no hay vida en Marte... (L. A.).

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS, por E. A. Brun, A. Martinot-Lagarde y J. Mathieu. Editorial Labor, S.A. vol. I (1979) y vol. II (1980). Es ésta una obra muy extensa, publicada en tres tomos en la edición original francesa y, en dos, en la versión española. El primer tomo de la traducción abarca el primero francés y la parte del siguiente referente a movimientos irrotacionales; para ello se ha cambiado el orden de la edición original, trastocando las partes "Ejemplos prácticos de movimientos de fluidos compresibles" y "Movimientos con potencial de velocidades". No parece que este cambio afecte a la estructura del libro. El segundo tomo en español incluye la porción restante del segundo y el tercer tomo franceses.

La traducción es buena, aunque en ocasiones un poco literal y algo desigual, debido esto último quizás al elevado número de traductores. Dada la extensión y complejidad de la obra, la labor de dicho equipo y su coordinación han tenido que ser arduas y difíciles, siendo los resultados obtenidos dignos del mayor encomio. El libro, según indican los autores, está dirigido a dos tipos de audiencias: alumnos, tanto de ingeniería como de facultades de ciencias, y profesionales que se encuentran con problemas de mecánica de fluidos y quieren poner al día sus conocimientos básicos de la materia para aplicarlos.

Es intención de los autores que el libro sea pedagógico y, en lo posible, autodidáctico. Con tal fin los problemas se atacan individualmente, yendo de lo particular a lo general. En mi opinión esta forma de enseñar la mecánica de fluidos presenta cierta desventaja, en el sentido de que el lector puede perder la visión de conjunto y llegar a pensar, tal vez, que los problemas que se tratan constituyen un rosario de casos aislados sin relación entre sí. Es significativo el hecho de que en la traducción española se hayan cambiado de orden dos capítulos sin que surjan dificultades importantes. Las ecuaciones de Navier-Stokes se incluyen, completas, en uno de los últimos capítulos del libro, en un apartado intitulado "Capa límite y flujos viscosos", cuando en realidad constituyen la base de la asignatura y de ellas podrían haberse ido desgranando los distintos casos estudiados anteriormente.

Se trata de una obra profunda, con conceptos muy sutiles, muy bien abordados físicamente y con todo rigor, dentro de unas limitaciones que los autores, un tanto artificialmente, se han trazado. Reservas metodológicas aparte, el libro es bueno y completo; y merece la pena detenerse en él. El primer volumen consta de cuatro partes. La primera, titulada generalidades, repasa los conocimientos de matemáticas, mecánica y termodinámica necesarios para el estudio de la asignatura, así como algunas nociones introductorias de los fluidos y un capítulo dedicado a la semejanza. La segunda parte trata

de la fluidoestática; la tercera, de los movimientos unidimensionales y, la cuarta, de los movimientos potenciales. El segundo volumen consta de otras tres partes: la parte V estudia ejemplos de fluidos incompresibles, la VI se dedica a los fenómenos no estacionarios y, la VII, a la capa límite y flujos viscosos. Analicemos y valoremos uno a uno esos siete apartados.

En los tres primeros capítulos de la primera parte se explican nociones básicas del fluido: hipótesis de continuidad, medio continuo, nociones de cinemática, magnitudes fluidas típicas e interpretación de las propiedades de un gas por medio de la teoría cinética. Siguen tres capítulos de repaso de matemáticas, dinámica y termodinámica, de un nivel quizá demasiado alto para la utilización que luego se hará de los mismos: en cualquier caso, su tratamiento es bueno. Al afrontar el tema de la semejanza, y siguiendo la metodología general del libro, se reserva la demostración del teorema π para el final, considerando antes una serie de ejemplos. Tengo mis dudas sobre la localización de este capítulo, porque el alumno no puede pretender aplicar los conceptos de semejanza sin conocer las magnitudes que intervienen en los problemas, y ello sólo es posible hacerlo con rigor una vez planteadas las ecuaciones que rigen los procesos; una persona ya formada puede intuir vías de solución que le permitan solventar esta dificultad, pero no es ese el caso para quien se acerca por primera vez a la materia. De gran interés es la exposición de los métodos ópticos para el estudio experimental, que cierra esta primera parte.

La segunda, dedicada a fluidoestática, comienza con la introducción del concepto de presión y sus propiedades. Se dan las ecuaciones generales de la fluidoestática. Tras extenderse en la hidrostática y el equilibrio de cuerpos flotantes, se aborda el equilibrio de fluidos compresibles aplicándolo al estudio de la atmósfera y de los globos. Para concluir con una introducción al estudio de la tensión superficial, que contiene una serie de problemas al final del capítulo bastante interesantes, aunque algunos de ellos de dificultad desproporcionada para el nivel de la lección.

En la parte tercera, sobre los movimientos unidimensionales, explica con cierto detenimiento el concepto y la justificación de los mismos; las ideas que se manejan en esta lección son un tanto sutiles y quizá no del todo rigurosas. Una vez más, vale plantearse la pregunta de si, después de todo, es más sencillo ir de lo particular a lo general o viceversa. Al tratar de los fluidos de densidad constante, se introducen una serie de correcciones a la ecuación de Bernouilli debidas a los efectos de fricción y consiguiente falta de unidimensionalidad. Siguen una serie de aplicaciones de la ecuación de Bernouilli: derrame por un orificio y tubo de Pitot que, aunque no puedan considerarse estrictamente como unidimensionales, es éste su sitio lógico de aparición; tal vez hubiera sido conveniente llegar a este capítulo general a través de otro dedicado a la ecuación de Bernouilli; pero hubiera roto el plan didáctico que se marcaron los autores. Se ocupan luego del flujo compresible unidimensional, primero con la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y luego con la de la energía, seguidas por unas consideraciones interesantes referentes a la diferencia



entre temperatura de estancamiento y de recinto. (Sería interesante que se unificase en la bibliografía española la nomenclatura fluidomecánica; sirvan de ejemplo las palabras estancamiento y remanso que, si he entendido bien, son similares). En el estudio sobre el movimiento no viscoso en toberas convergentes y convergente-divergentes incluyen la aparición de ondas de choque y discuten el efecto del bloqueo sónico. A continuación, se abordan los efectos de fricción y adición de calor en el tema de los flujos compresibles, donde vuelven a examinarse los efectos de bloqueo sónico. No se dejan en el tintero una incursión sobre detonaciones y deflagraciones. El último capítulo de esta parte, dedicado a movimientos con superficie libre, trata de las ondas de gravedad, el resalto hidráulico y los movimientos permanentes con y sin efecto de fricción.

La parte IV lleva por título "Movimientos con potencial de velocidades". Una vez introducidos los conceptos de rotación y deformación de una partícula, se explican los de potencial de velocidades y función de corriente. Se incorpora luego el potencial de aceleraciones, con las condiciones necesarias para su existencia, dando paso a los teoremas de Thomson y Lagrange sobre conservación de la circulación y existencia del potencial de velocidades. La lección siguiente trata de ejemplos simples de movimientos irrotacionales y el enunciado de la paradoja de D'Alembert, demostrada únicamente para la esfera. Vienen a continuación dos capítulos sobre movimientos planos, en los que se introduce el potencial complejo y la representación conforme, haciendo aplicación a los álabes y cascadas de álabes; se echa de menos que, siguiendo la filosofía del libro, los autores no hayan recurrido a otros medios más sencillos y directos para describir la corriente alrededor de perfiles, sin necesidad de hacer uso de la transformación conforme. Se exponen, por último, las analogías reoeléctricas.

Los ejemplos prácticos de fluidos incompresibles constituyen el tema a desarrollar en la parte V, en cuyos tres primeros capítulos se pasa revista al movimiento confinado en conductos y a la pérdida de carga en movimientos laminares, turbulentos y en singularidades. Al abordar el movimiento laminar no se olvida de la medida de la viscosidad, apartado que incluye también unas nociones sobre reología. Las primeras nociones sobre turbulencia se introducen en esta parte y se llega a obtener la ley de pared sin demostrarla (para la parte logarítmica); dado el carácter del libro, cabía esperar una profundización mayor en este punto. Se dan los gráficos y fórmulas típicas de pérdidas de carga en conductos. El capítulo de pérdidas locales es muy completo y contiene alguna idea nueva e interesante. En el programa de la obra llega ahora el momento de explicar la aplicación de la conservación de cantidad de movimiento a chorros, fundamentalmente para propulsión, y las turbomáquinas; pero no alcanzo a ver la razón de situar precisamente aquí estos dos capítulos. La teoría de la lubricación se expone a renglón seguido.

La parte dedicada a fenómenos no estacionarios comienza con un capítulo sobre casos unidimensionales, donde se estudian, primero, las oscilaciones en el tubo en U y el establecimiento de una corriente en un conducto, y, luego, las ondas unidimensionales de pequeña

amplitud dentro de las que se incluye el golpe de ariete; el caso de cierre lento de una válvula se deja, con gran acierto, como ejercicio. De relevante interés, el apartado siguiente versa sobre dispositivos neumáticos para transmitir información, que puede servir como introductorio para el estudiante de la fluídica. La parte VI termina su temario con un capítulo sobre propagación de ondas superficiales de pequeña amplitud; se incluyen los casos de agua profunda y profundidad finita y se recuperan los resultados correspondientes al capítulo de movimientos unidimensionales.

La parte VII es la más extensa. Se titula "Capa límite y flujos viscosos", denominación quizás un poco inexacta, pues de los flujos viscosos ya se ocupó la parte V al estudiar la corriente de Poiseuille y la teoría de la lubricación. Antes, la noción de capa límite sólo había recibido un breve tratamiento introductorio en la parte III, lo que en alguna forma sirvió de justificación para la exposición de fluidos ideales. Tras la explicación del concepto de cada límite, se detiene en la comprensión de la misma a partir de las ecuaciones globales y de una serie de nociones intuitivas, para llegar a resultados concretos en lo referente a la estructura, distribución de esfuerzos y fuerzas, en el caso laminar y turbulento, e incluyendo el efecto de rugosidad, para placas planas como con variación de presión exterior. Las dos lecciones siguientes abordan las capas límites para difusión de calor y masa, con especial énfasis en la transmisión de calor; se consideran también los efectos de calentamiento cinético debido al frenado del fluido. Por fin, en la siguiente, casi la última del libro, los autores se deciden a escribir las ecuaciones de Navier-Stokes, en su forma completa, aunque, por alguna razón que no adivino, en el caso compresible lo hacen para un gas monoatómico, usando la relación de Stokes. Vuelven a deducirse luego, en forma rigurosa, las ecuaciones de la capa límite, ahora que ya se dispone de las ecuaciones generales, y detallar una serie de razonamientos y deducciones que antes no se pudieron realizar. La lección titulada "Otros ejemplos de flujos laminares" recoge problemas muy variados: el movimiento entre dos cilindros, la corriente de Rayleigh para una placa plana que se acelera instantáneamente, el movimiento en medios porosos, la corriente de Hele-Shaw, la corriente lenta alrededor de una esfera y el estudio de suspensiones. Al referirse a la resistencia aerodinámica, relacionada fundamentalmente con cuerpos romos, se detienen en el desprendimiento de la capa límite y la formación de torbellinos. La última lección del libro nos introduce en los cuerpos perfilados de envergadura finita con aplicación a alas de avión, aportando la noción de resistencia inducida, aunque sin llegar a plantear la ecuación integral para calcular la distribución de la circulación, lo que resulta sorprendente teniéndolo prácticamente hecho. Se termina el capítulo con unas nociones de aerodinámica experimental.

A modo de resumen: estamos ante un libro muy bueno y completo; una obra que los autores quisieron pedagógica y sencilla, tarea harto difícil dada la naturaleza de la materia. Al crítico le queda la duda de si esa aparente simplificación del tratamiento compensa la enorme extensión del libro y falta de unidad en el desarrollo. (A. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ESPERMATOGENESIS

ACIDIC PROTEINS OF THE NUCLEUS. Dirigido por I. L. Cameron y J. R. Jeter, Academic Press, 1974.

CHANGES IN NUCLEAR AND CHROMATIN COMPOSITION AND GENOMIC ACTIVITY DURING SPERMATOGENESIS IN THE MATURING ROOSTER TESTIS. Cristóbal Mezquita y Ching Sung Teng en *The Biochemical Journal,* vol. 164, págs. 99-111, 1977.

CHANGES IN CHROMATIN STRUCTURE DURING SPERMATOGENESIS IN MATURING ROOSTER TESTIS AND DEMONSTRATED BY THE INITIATION PATTERN OF RIBONUCLEIC ACID SYNTHESIS IN VITRO. Cristóbal Mezquita y Ching Sung Teng en *The Biochemical Journal,* vol. 170, págs. 203-210, 1977.

MULTIPLICACION GENICA Y RESISTENCIA A FARMACOS

AMPLIFIED DIHYDROFOLATE REDUCTASE GENES ARE LOCALIZED TO A HOMOGENEOUSLY STAINING REGION OF A SINGLE CHROMOSOME IN A METHOTREXATE-RESISTANT CHINESE HAMSTER OVARY CELL LINE. Jack H. Nunberg, Randal J. Kaufman, Robert T. Schimke, Gail Urlaub y Lawrence A. Chasin en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* vol. 75, n.° 11, págs. 5553-5556, noviembre, 1978.

GENE AMPLIFICATION AND DRUG RESISTANCE IN CULTURED MURINE CELLS. Robert T. Schimke, Randal J. Kaufman, Fred W. Alt y Rodney F. Kellems en *Science,* vol. 202, n.° 4372, págs. 1051-1055; 8 de diciembre de 1978.

DESCUBRIMIENTO DE UNA LENTE GRAVITATORIA

0957 + 561 A, B: TWIN QUASISTELLAR OBJECTS OR GRAVITATIONAL LENS? D. Walsh, R. F. Carswell y R. J. Weymann en *Nature,* vol. 279, n.° 5712, págs. 381-384; 31 de mayo de 1979.

THE DOUBLE QUASAR 0957 + 561: A RADIO STUDY AT 6-CENTIMETERS WAVELENGTH. D. H. Roberts, P. E. Greenfield y B. F. Burke en *Science,* vol. 205, n.° 4409, págs. 894-896; 31 de agosto de 1979.

MULTIPLE-MIRROR TELESCOPE OBSERVATIONS OF THE TWIN QSOs 0957 + 561 A, B. R. J. Weymann, F. H. Chaffee, Jr., M. Davis, N. P. Carleton, D. Walsh y R. F. Carswell en *Astrophysical Journal Letters,* vol. 233, n.° 2, 2.ª parte, págs. L43-L46; 15 de octubre de 1979.

CARBOHIDRATOS

BIOSYNTHESIS AND FUNCTION OF GANGLIOSIDES. Peter H. Fishman y Roscoe O. Brady en *Science,* vol. 194, n.° 4268, págs. 906-915; 26 de noviembre de 1976.

SURFACE SUGARS OF ANIMAL CELLS AS DETERMINANTS OF RECOGNITION IN BACTERIAL ADHERENCE. I. Ofek, E. H. Beachey y N. Sharon en *Trends in Biochemical Science,* vol. 3, págs. 150-160; 1978.

EL APARATO VESTIBULAR

ROLE OF THE VESTIBULAR SYSTEM IN POSTURE AND MOVEMENT. Laurence R. Young en *Medical Physiology,* dirigido por V. B. Mountcastle. The C. V. Mosby Company, 1974.

THE LABYRINTH, THE BRAIN, AND POSTURE. Victor J. Wilson en *American Scientist,* vol. 63, n.° 3, págs. 325-332; mayo-junio, 1975.

MAMMALIAN VESTIBULAR PHYSIOLOGY. Victor J. Wilson y Geoffrey Melvill Jones. Plenum Press, 1979.

SUPERCONDUCTORES EN CIRCUITOS DE POTENCIA

SUPERCONDUCTIVITY IN SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por Morrel H. Cohen. University of Chicago Press, 1968.

SOLENOID MAGNET DESING: THE MAGNETIC AND MECHANICAL ASPECTS OF RESISTIVE AND SUPERCONDUCTING SYSTEMS. D. B. Montgomery. Wiley-Interscience, 1969.

HIGH-FIELD, HIGH-CURRENT SUPERCONDUCTORS. J. K. Hulm y B. T. Matthias en *Science,* vol. 208, n.° 4446, páginas. 881-887; 23 de mayo de 1980.

EL POBLAMIENTO DEL PACIFICO

THE PACIFIC ISLANDERS. William Howells. Weidenfeld y Nicolson, 1973.

SUNDA AND SAHUL: PREHISTORIC STUDIES IN SOUTHEAST ASIA, MELANESIA AND AUSTRALIA. Dirigido por J. Allen, J. Golson y R. Jones. Academic Press, 1977.

MAN'S CONQUEST OF THE PACIFIC: THE PREHISTORY OF SOUTHEAST ASIA AND OCEANIA. Peter Bellwood. Oxford University Press, 1978.

THE POLYNESIANS: PREHISTORY OF AN ISLAND PEOPLE. Peter Bellwood. Thames and Hudson Ltd., 1978.

THE PREHISTORY OF POLYNESIA. Dirigido por Jesse D. Jennings. Harvard University Press, 1980.

REACCIONES QUIMICAS SIN SOLVATACION

ION CYCLOTRON RESONANCE SPECTROMETRY. Dirigido por H. Hartmann y K.-P. Wanczek. Springer-Verlag, 1978.

PULSED ION CYCLOTRON RESONANCE MASS SPECTROMETER FOR STUDYING ION-MOLECULE REACTIONS. Robert T. McIver, Jr., en *Review of Scientific Instruments,* vol. 49, n.° 1, págs. 111-118; enero, 1978.

THE GAS PHASE ACIDITY SCALE. J. E. Bartmess y R. T. McIver, Jr., en *Gas Phase Ion Chemistry,* dirigido por M. T. Bowers. Academic Press, 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

TAXICAB GEOMETRY-A NON-EUCLIDEAN GEOMETRY OF LATTICE POINTS. Donald R. Byrkit en *The Mathematics Teacher,* vol. 64, n.° 5, págs. 418-422; mayo, 1971.

TAXICAB GEOMETRY. Eugene F. Krause. Addison-Wesley Publishing Company, 1975.

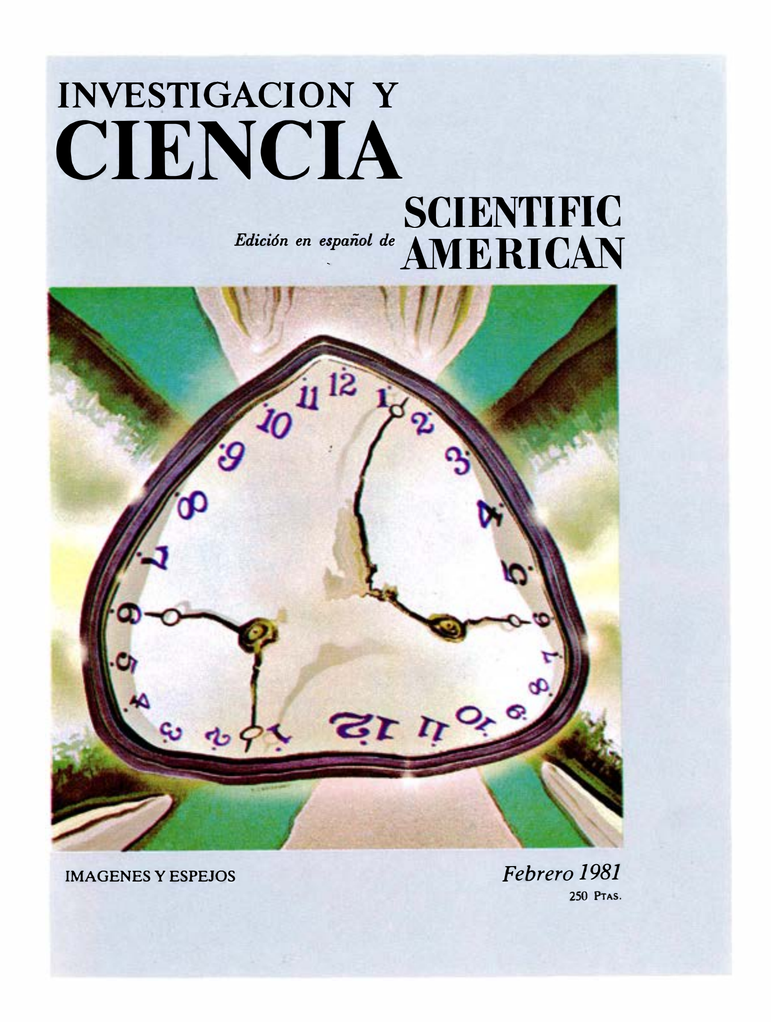
TALLER Y LABORATORIO

PATTERN RECOGNITION IN HUMANS: CORRELATIONS WHICH CANNOT BE PERCEIVED. Leon Glass y Eugene Switkes en *Perception,* vol. 5, n.° 1, págs. 67-72; 1976.

FLOATING TV PICTURES. Jearl Walker en *The Flying Circus of Physics with Answers.* John Wiley & Sons, Inc., 1977.

PHYSIOLOGICAL MECHANISMS FOR THE PERCEPTION OF RANDOM DOT MOIRÉ PATTERNS. L. Glass en *Pattern Formation by Dynamic Systems and Pattern Recognition,* dirigido por H. Haken. Springer-Verlag, 1979.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA FABULA, por Francisco Rodríguez Adrados
Podemos hoy reconstruir una historia de este género a través de ramificaciones y de confluencias dentro de una tradición fundamentalmente unitaria.

LA CONDUCTA ADICTIVA, por Vincent P. Dole
Se trate de la adición a las drogas, al alcohol o al tabaco, el problema es la conducta autodestructiva. Se ha logrado devolver la salud mediante un tratamiento de mantenimiento con metadona.

LA ASIMETRIA COSMICA ENTRE MATERIA Y ANTIMATERIA, por Frank Wilczek
Parece que el universo actual está formado casi enteramente por materia. Se dispone de datos, tanto cosmológicos como de física de partículas, que permiten esbozar ya una explicación.

PLASMIDOS, por Richard P. Novick
Estos elementos genéticos de las bacterias, conocidos sobre todo como portadores de resistencia a antibióticos y como vectores en ingeniería genética, son verdaderos organismos subcelulares situados en el umbral de la vida.

LA FORMACION DE IMAGENES EN LOS ESPEJOS, por David Emil Thomas
Las imágenes que proporcionan los espejos no corresponden siempre a una reflexión fidedigna. Estas imágenes pueden ser invertidas, trastocadas en su lateralidad o distorsionadas en varios sentidos.

EL SISTEMA DE HUIDA DE LA CUCARACHA, por Jeffrey M. Camhi
¿Cómo evade este insecto el pisotón de una persona o la acometida de un sapo? Los mecanismos de los que se vale son un modelo simple de los que intervienen en formas de comportamiento más complejas.

EL HOMBRE PRIMITIVO EN EL ASIA CENTRAL SOVIETICA, por Richard S. Davis, Vadim A. Ranov y Andrey E. Dodonov
En la república de Tadzhik se han acumulado, a lo largo de más de dos millones de años, profundos depósitos de loess. En ellos se han descubierto útiles de piedra fabricados hace unos 250.000 años por cazadores-recolectores del Paleolítico inferior.

GALILEO OBSERVA NEPTUNO, por Stillman Drake y Charles T. Kowal
Lo observó por primera vez en 1612 y creyó que se trataba de una estrella fija, unos 234 años antes de que se descubriera que era un planeta. Sus datos nos hacen dudar de la exactitud de los cálculos modernos sobre la órbita de Neptuno.

